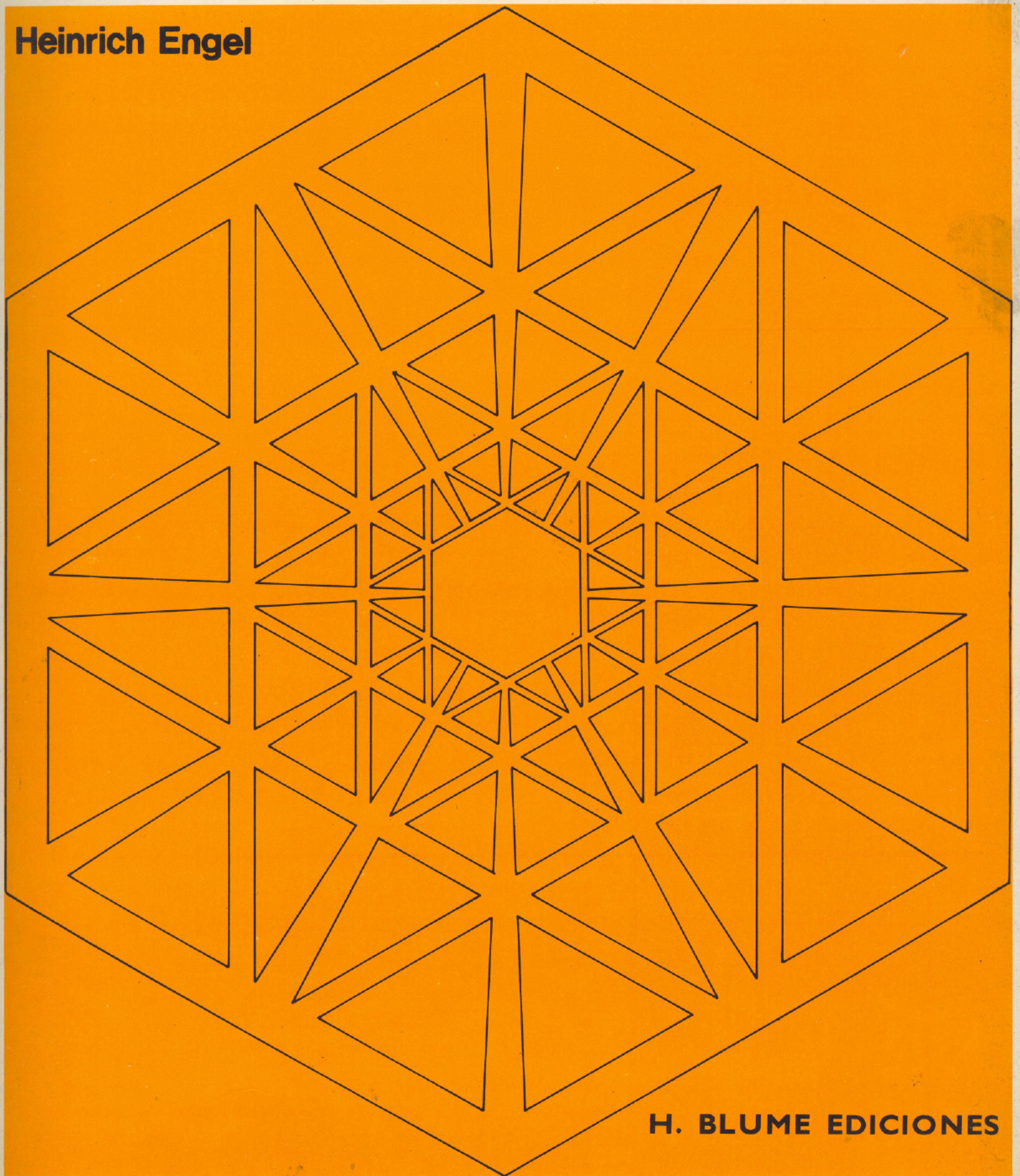
sistemas de estructuras

Heinrich Engel



H. BLUME EDICIONES

SISTEMAS DE ESTRUCTURAS

por H. Engel

Este libro es el resultado de un esfuerzo mantenido durante varios años. Empleando excelentes dibujos y fotografías de maquetas, el complejo *comportamiento de la estructura* queda ilustrado de manera simple. La *relación entre estructura* y *forma arquitectónica* se muestra en la obra, y así se aplica un serio estímulo al arquitecto proyectista para la *formulación de ideas estructurales*.

En su orientación y tratamiento específico, la obra difiere sustancialmente de las publicaciones existentes hasta la fecha sobre la materia, y esto lo consigue mediante:

Su preocupación por los *sistemas* de estructuras, como el verdadero objetivo del proyecto estructural.

La presentación de estructuras *típicas*.

La investigación fotográfica de *modelos* estructurales.

El empleo de comunicación *gráfica* por medio de dibujos y maquetas.

La derivación de *nuevas* formas a partir de prototipos establecidos.

Este libro poco corriente es un *libro de referencia*, en cuanto que compendia y organiza el repertorio completo de estructuras arquitectónicas tan profusamente disperso en la literatura. Es un *manual de proyecto* en cuanto que abre una fuente de formas arquitectónicas básicas para los modernos proyectos, y que sugiere posibilidades de futuro desarrollo. Promete convertirse en una *obra modelo* en su género.

sistemas de estructuras

versión española:

Fernando de Aguirre e Yraola
Doctor Arquitecto

Juan Batanero García/Geraldo
Doctor Ingeniero de Caminos


H. BLUME EDICIONES
c. Rosario, 17 · Madrid, 5

Título original: Tragsysteme - Structure Systems

Primera edición española 1970 de la versión alemana
Primera reimpresión española 1977
Segunda reimpresión española 1978
Tercera reimpresión española 1979

Depósito legal: M. 25.471-1979
ISBN: 84-7214-005-9
Printed in Spain - Impreso en España
Imprime: Artigrafía, S. A. Tucán, 36 - Madrid-25

Reconocimiento

Este trabajo debe agradecer mucho la ayuda prestada por personas e instituciones. Su papel en la elaboración del proyecto fue de diversa índole; su contribución a la completa realización, esencial; su participación en el producto final no puede ser realmente estimada mediante palabras. Por tanto, el mejor tributo que se puede rendir a aquéllas es exponer los hechos específicos de su participación; y hacerlo en orden cronológico no solamente resuelve la tarea imposible de establecer una escala de prioridad, sino que también pone en evidencia cómo la historia de esta obra es realmente la de la inspiración, ayuda y consejos de aquellas personas e instituciones que colaboraron para su realización.

El Profesor Ralph Rapson, Director de la Escuela de Arquitectura de la Universidad de Minnesota

encendió la llama que iluminó la idea de este libro y escribió el prólogo.

El Dr. Ing. Hannskarl Bandel, socio de Severud - Perrone - Fischer - Sturm - Conlin - Bandel, Ingenieros Consultores, Nueva York,

inspiró con sus trabajos, como ingeniero y científico, muchos pensamientos de este libro; animó el tratamiento intuitivo de una materia científica y escribió el artículo final.

La Universidad de Minnesota

proporcionó la oportunidad para la realización de experiencias sin restricciones y ofreció el ambiente intelectual y físico para los estudios iniciales.

Los estudiantes de Arquitectura de la Universidad de Minnesota

construyeron los primeros modelos e inspiraron las técnicas de información no convencionales.

El Comité para Asuntos de Investigación de las Facultades, de la Universidad de Minnesota,

concedió fondos para los estudios básicos.

Guntis Plesums, M. Arch,

trabajó como asiduo colaborador en el proyecto desde 1961 a 1963; elaboró partes del capítulo «Sistemas estructurales de vector activo» y fue una valiosa ayuda en las fases más críticas del proyecto.

Los alumnos de Arquitectura de la Escuela de Oficios Artísticos de Offenbach

participaron activamente en los estudios finales, construyeron modelos e hicieron posible la elaboración gráfica del conjunto.

El Dipl. Ing. Gerhard Harmgart

revisó los dibujos y el texto, desde el punto de vista de la práctica de la ingeniería, y aportó sugerencias para la claridad de la forma y del contenido.

Los Dipl. Ings. Douglas Carter y Murray Church

revisaron el texto inglés.

La Editorial Deutsche Verlags-Anstalt, de Stuttgart,

demostró receptividad hacia lo no convencional: aportó dinamismo y estilo a la elaboración del conjunto y dotó a la obra de su forma definitiva.

Prólogo de Ralph Rapson

Con el alcance y la complejidad rápidamente crecientes de la práctica arquitectónica, al arquitecto actual se le plantea el problema, más arduo que en ninguna otra época histórica, de asimilar los múltiples avances científicos y tecnológicos al arte de la Arquitectura. Un aspecto principal de este problema consiste en la integración de una estructura creadora, imaginativa y pura, desde el punto de vista económico, en el proceso del proyecto.

En este libro, madurado y provocador, el Arquitecto Heinrich Engel explaya este problema, tan eminentemente crítico, y propone un atrevido y único camino para salvar la brecha existente entre la teoría y la realidad de las estructuras.

El libro se ocupa de los sistemas estructurales arquitectónicos y se halla claramente determinada la razón primordial para estos sistemas: la creación de la forma y del espacio arquitectónicos. Explicando los mecanismos de las estructuras arquitectónicas, principalmente por medios gráficos, y sugiriendo su vasto potencial para el proyecto arquitectónico, se pone al alcance de la mentalidad del arquitecto, efectivamente, un complejo factor de los múltiples que configuran el ambiente, así como se enfoca claramente un exhaustivo acervo de conocimientos capaces de excitar su imaginación creadora.

Tal es la significación de este libro y en ella pueden reconocerse las directrices y el programa arquitectónicos de la Universidad de Minnesota, que ha desarrollado Heinrich Engel en los pasados años y para los cuales ha prestado una importante y duradera aportación durante su tarea de ocho años como profesor extraordinario.

Dejar sentados los anteriores conceptos no significa otra cosa que encauzar al libro en la perspectiva adecuada y definir el ambiente intelectual, en el cual la idea del presente libro fue concebida y se establecieron sus fundamentos.

Proyecto: síntesis creadora

Un proyecto arquitectónico es un arte y, a la vez, el acto que resuelve el conflicto entre el hombre y su ambiente. Proyectar constituye un complejo e intrincado proceso, pero en lo profundo de cualquier situación ambiental radica una solución natural u orgánica. Existen varios factores o componentes, tales como continuidad histórica, condiciones de ubicación regionales y específicas, necesidades físicas y psicológicas de la sociedad, innovaciones estructurales y ventajas tecnológicas, forma expresiva y espacio creador, los cuales configuran nuestro entorno. Solamente por medio de un análisis juicioso y detallado, así como de una comprobación diligente en todos los factores inherentes a la estructura mental de nuestro tiempo, puede desarrollarse la síntesis creadora.

Las exigencias y responsabilidades multifacéticas de un proyecto de configuración total requieren hoy día, por parte del arquitecto, una comprensión nunca imaginada hasta el presente. Si aquél espera producir soluciones relevantes, a medida del gran potencial de nuestro tiempo, ha de reconocer que la Arquitectura, siendo ante todo un arte, se ha convertido en una ciencia extremadamente precisa, basada en la aplicación coordinada de los más variados ámbitos del conocimiento.

Hoy día, cualquier situación ambiental es capaz de envolver al arquitecto en una gama amplia de actividades —desde la promoción y programación hasta la investigación y la evaluación estadística, desde la vasta escala urbana y la planificación regional al diseño y la supervisión de la construcción—. Se pretende del arquitecto que sea, a la vez, universal y especialista, o, al menos, que deba estar suficientemente versado en economía, sociología, estética, ingeniería, planificación y diseño, para que sea capaz de integrar todos estos conocimientos en una síntesis creadora.

Práctica: diversidad de talentos

En la realidad de la práctica arquitectónica, sin embargo, una tal integración se consigue raramente en un individuo. Lo más frecuente es que esa tarea abrumadora se realice en varios grados por un esfuerzo de equipo coordinado. Esto no implica necesariamente que el proyecto se realice a base de comisiones sin un mando definido, ya que, aunque varios participen activamente en el proceso del proyecto, debe existir, a mi juicio, solamente una autoridad central.

Esto quiere decir que existen arquitectos de diverso talento e interés que pueden realizar una labor eficaz si se les encaja en su capacidad específica. En efecto, será útil, e incluso necesario, un alto grado de especialización en la práctica del proyecto; pero introducir esta vasta especificación en la educación y formación escolar del individuo es algo muy distinto. Durante esta última, la evolución de la mente del joven arquitecto no se halla lo suficientemente avanzada para poder determinar en dónde reside su principal talento. La educación no puede moldear todos sus productos conforme a formas fijamente predeterminadas. Se sigue de ello, pues, que lo general ha de preceder a lo específico, en lo que se refiere a principios básicos y procedimientos.

Educación: preocupación por el individuo

La educación formal del arquitecto es un doble proceso. Por un lado es necesario poseer una formación amplia y madura —un concepto y una convicción arquitectónicos— propia de las aspiraciones y capacidades de nuestro tiempo, y, por otra parte, es preciso desarrollar los múltiples métodos y herramientas —el conocimiento técnico y detallado— necesarios para llevar a cabo el producto coordinado.

Lo fundamental para la educación es comprender que no podemos poseer una seguridad total en la finalidad de cualquier conocimiento o hecho, y que no existen respuestas absolutas para cualquier pregunta. La Arquitectura, motivada por los problemas de la Humanidad y vinculada a éstos, proporciona muy raras veces una solución blanco-negro para una situación ambiental. Antes bien, se consigue aquella mediante la gran riqueza de toda la paleta de colores del arquitecto, limitada básicamente sólo por sus cualidades innatas y desarrolladas.

Fundamentalmente, la educación se refiere al individuo; ha de desarrollar la iniciativa y las potencias intelectuales de aquél, y existen tres amplias fases para este proceso: en primer lugar, la mente ha de aprender a analizar clara y lógicamente, así como a pensar de una manera creadora; en segundo lugar, ha de desarrollar su capacidad para emplear el conocimiento con criterio, o aplicarlo, también de un modo creador, y, en tercer lugar, ha de permanecer siempre alerta y fluida, con objeto de no perder la capacidad para inquirir y aprender.

La completa comprensión de este proceso del que aprende es esencial. El pensamiento creador no es un fenómeno místico ni aislado, y sólo puede ser el resultado de la adquisición ordenada del conocimiento de los hechos, que son básicos para el logro del objetivo en toda su extensión.

Esta disciplina es fundamental para la educación, aunque constituye una decisión crítica la cantidad o calidad del conocimiento de los hechos que hayan de ser seleccionados. Las prácticas y hábitos normales, así como las respuestas conocidas, no dejan frecuentemente lugar para dudas, y sin la duda no existe uno de los incentivos más poderosos para aprender. A medida que se adquiere más información y conocimiento de soluciones previamente acompañadas por el éxito aparece el peligro, siempre latente, de la atrofia de la imaginación.

La solidez es una característica básica necesaria al arquitecto; la educación ha de imbuir al estudiante la costumbre de investigar y una manera de proceder tales que le capaciten para adquirir más tarde todos los conocimientos y emplear sabiamente la información relativa a cada caso particular que se le plantee.

La síntesis creadora es, preeminentemente, la savia de la educación y práctica arquitectónicas. La habilidad para aplicar el conocimiento adquirido con imaginación y criterio es necesaria para todo arquitecto creador. Existe una confusión considerable y un escaso entendimiento real respecto del acto creador. En un sentido amplio, me parece que la acción creadora arquitectónica se basa en la habilidad para mantener una extensa y plena asociación mental dentro de la estructura del conocimiento adquirido.

La intuición o inspiración es un factor esencial en la creación arquitectónica. Sin embargo, la inspiración no es ocioso sueño como algunos imaginan; antes bien, es una tarea ardua, amada. La acción intuitiva, a veces sin una razón aparente, no se realiza nunca sin una guía, y esta guía la conoce el arquitecto por medio de una trama formada por educación, conocimientos adquiridos, solera familiar, gusto, entendimiento, convicciones y sentido ético.

Si poseer conocimientos es importante, la educación no consiste predominantemente en la adquisición de hechos y datos; antes bien, la educación debe excitar e inflamar la inteligencia, abrir horizontes y enseñar a pensar al individuo. A este fin constituye un imperativo que la educación estimule y nutra la mente, ya que gran parte de la calidad dinámica que deseamos infiltrar en ésta es el resultado de hacer del proceso aprehensivo una aventura excitante —una continua búsqueda de lo nuevo y de lo desconocido— que culmine, para el arquitecto, en una síntesis creadora.

Como arquitecto practicante y educador de arquitectos, me he ocupado con la teoría y con la realidad. Hace mucho que he comprobado que los métodos normales para introducir y enseñar estructuras arquitectónicas al joven arquitecto están lejos de ser satisfactorios, son demasiado complicados y, generalmente, confusos y mal encauzados. No son aptos para establecer relaciones precisas para el acto total que constituye el proyecto arquitectónico y tampoco de un carácter que estimule la aplicación creadora de bases estructurales por parte del joven proyectista.

Convencido de que la participación activa en la construcción real impulsa considerablemente, en especial la docencia de cualquier materia específica de la Arquitectura, creo que el arquitecto en ejercicio, con mentalidad progresiva y con particular interés y talento para la especialidad elegida, es el más indicado para introducir dicha enseñanza específica al joven arquitecto.

Por tanto, en 1959 animé a Heinrich Engel, docente a la sazón en la Escuela de Arquitectura, para que desarrollara un curso sobre estructuras arquitectónicas, que aclarara los principios básicos para la creación y desarrollo de las estructuras y diera a conocer las posibilidades del proyecto de los sistemas estructurales.

Es de agradecer en grado sumo que la brillante labor desarrollada en el curso por Heinrich Engel haya proporcionado la base de esta aproximación, altamente creadora y original, para la comprensión y el empleo de las estructuras arquitectónicas.

Este libro interesará a todo aquel implicado en el proyecto de edificios: al estudiante y al profesor de Arquitectura, así como al arquitecto en ejercicio. Para el estudiante constituirá un método positivo, por medio del cual podrá adquirir rápidamente un conocimiento amplio y eficiente de todas las estructuras; al arquitecto le comunicará un estímulo y le mostrará nuevas posibilidades para el proyecto de sus edificios; al profesor le proporcionará, reunido, un material sobre temas tan ampliamente dispersos por la literatura técnica y le ayudará a programar sus investigaciones.

La obra desvanecerá la idea preconcebida de que una materia eminentemente técnica no puede tratarse con rigor y profundidad por medios gráficos. Refiriéndose solamente a sistemas y excluyendo los detalles que con demasiada frecuencia sólo contribuyen a oscurecer el problema básico, el libro es un prototipo en su género, y por ello puede constituir un estímulo para otros sistemas similares de investigación de otros sectores especializados que configuran el proyecto arquitectónico en nuestro tiempo.

Ralph Rapson

Sistemas de Estructuras

Perpectiva: dilema de la educación arquitectónica

El avance de la ciencia y de la tecnología ha ampliado y convertido en muy complejo el tema del proyecto de edificios y ciudades, así como el de la planificación de su desarrollo. Ya, incluso la concepción inicial de ideas formales para edificios singulares o para urbanizaciones, se ha convertido, más bien, en escrutinio y aplicación del extenso ámbito de datos científicos que colaboran a la realización del proyecto, y se manifiesta cada vez menos como el acto independiente de una mente creadora individual.

Este ámbito, que las ciencias de la construcción han hecho accesible, ha alcanzado entre tanto una extensión que ningún individuo —sea o no arquitecto— puede medirlo completamente ni aprovecharlo para su proyecto. Ello quiere decir que ninguna mente aislada puede realizar ya un proyecto que pueda ser llamado propiamente «contemporáneo»; es decir, un proyecto que se halle a nivel de esta era científica y tecnológica. Pues ningún ser humano, él por sí solo, es capaz de evaluar completamente las últimas aportaciones de la tecnología de la construcción contemporánea y del urbanismo o de utilizar e integrar en la edificación todos aquellos factores que la investigación científica ha demostrado hace ya mucho, y que influyen poderosamente en el bienestar material e individual del hombre.

Así, pues, el arquitecto y el urbanista, al proyectar edificios y ciudades contemporáneas, dependen de los argumentos e investigaciones de especialistas científicos. Lo poco que ellos saben sobre diversos campos del conocimiento no les capacita para enjuciar diversos puntos de vista en conflicto y coordinar éstos, y aún menos para incorporarlos a su concepto de proyectar. Si el arquitecto es famoso, puede simplemente imponerse sobre los argumentos contrarios de los especialistas; si no lo es, estará a merced de aquellos.

Mientras este desarrollo de un ámbito de conocimientos sin cesar en aumento fuerza al ingeniero a concentrarse en una sola especialidad, confirmando así su existencia profesional, el mismo desarrollo pone en peligro la existencia de una profesión, cuya orientación ha de ser universal en vez de particular: el arquitecto. Porque le obliga a reducir continuamente su conocimiento y su práctica en cada uno de los campos especializados, de manera que pueda abarcarlos todos.

En vista de esta situación se ha avanzado la idea de que el arquitecto sea él mismo un especialista dentro de un equipo de especialistas que colaboran en el proyecto de edificios y ciudades, de que actúe como el especialista del espacio-forma en materias de construcción, tanto funcionales como estéticas. En realidad, en muchos casos de edificación compleja trabaja el arquitecto con ese carácter, garantizándose su papel directivo más por contrato que por calificación.

Sin embargo, de igual modo que cualquier proceso mental original no puede ser compartido por dos o más individuos —es la esencial soledad humana—, así también la idea para el proyecto de un ambiente físico, ya sea casa, vecindad, ciudad o paisaje, puede originarse solamente en una mente única; la idea no puede ser sólo la suma coordinada de varias mentes, luchando cada cual por la supremacía o la mayor parte.

Por otra parte, la mente individual sólo está capacitada para el juicio crítico si ejerce un mando sobre un conocimiento sólico acerca de cada sector científico por separado. El simple conocimiento de algunos pocos principios científicos podrá evitar grandes errores en la construcción, pero excluirá la utilización de ese poder que la búsqueda científica en la naturaleza del hombre y de las cosas ha inferido. Lo que se necesita es un conocimiento que capacite al arquitecto para interpretar hechos científicos de un modo creador y deducir de ellos ideas para su proyecto.

Tal es, pues, el dilema del arquitecto contemporáneo: la discrepancia existente entre la amplitud de los conocimientos exigidos, por una parte, y la limitación de una sola mente humana, por otra. Esta discrepancia se manifiesta ya en las raíces de los problemas en las actuales escuelas de Arquitectura, afectando vitalmente la posición del arquitecto en la sociedad científica de la época contemporánea. La siguiente cuestión es fundamental: ¿existen medios para resolver esta discrepancia, y, de existir, cuáles son?

La dificultad para encontrar respuesta a estas preguntas se manifiesta por la multiplicidad de factores implicados en la construcción contemporánea. Las técnicas de estructuras, electricidad, mecánica o acústica son factores tan integrados en la edificación moderna como las consideraciones financieras, económicas, sociológicas, higiénicas o psicológicas. Al proyectar un edificio no puede descartarse ninguna de esas materias sin correr el peligro de lastrarle con cualidades que produzcan obsolescencia y le conviertan en ineficaz, aun antes de estar acabado.

Todo esto se ha reconocido por prácticos y teóricos, estando de acuerdo unánimemente en la necesidad de un conocimiento sólido de cada una de las diferentes ciencias que intervienen en la construcción. Sin embargo, hay diversos criterios en cuanto al método óptimo para adquirir este conocimiento y la amplitud en que debe poseerse.

Aquí se manifiesta una cuestión vital en la profesión de arquitecto:

— Definición del contenido y amplitud de lo que el arquitecto debe conocer sobre cada una de las ciencias de la construcción.
— Elección del método y medios óptimos por los cuales el arquitecto puede alcanzar este conocimiento.

Una tal decisión es urgente y fundamental, ya que decidirá el éxito o el fracaso

de los intentos para reforzar la débil influencia que el arquitecto ejerce hoy día entre los profesionales del mundo actual y para identificar, de un modo preciso, su imagen profesional en la era de la técnica.

Las estructuras en la construcción: nueva situación

De todos los elementos que componen una forma material rígida —casa, máquina, árbol o cualquier ser animado—, la estructura es el más esencial. Sin la estructura, la forma material no puede ser preservada, y sin preservar la forma, al organismo interior no le es posible funcionar. De aquí se infiere la imposibilidad de existencia de ningún organismo, animado o inanimado, al no haber estructura.

En cuanto a Arquitectura se refiere existen, desde luego, otros muchos elementos que integran un edificio; pero su presencia no es vital para su existencia. Un edificio, en efecto, puede existir sin pintura o sin calefacción, pero no puede existir sin estructura. Y aunque la mera estructura no supone todavía Arquitectura, la hace, sin embargo, posible. Y esto tanto en lo que se refiere a la primitiva choza como al moderno edificio de altura.

Por consiguiente, el conocimiento del origen estructural de la Arquitectura es básico para la profesión de arquitecto. Sin embargo, mientras que el antiguo maestro de obras podía tratar fácilmente de los escasos problemas estructurales de sus edificaciones, con un conocimiento suministrado por la experiencia y la tradición, el arquitecto avanzado se hallará frente a un campo tan extenso, al resolver los problemas estructurales de sus edificios que ningún ingeniero, por sí solo, podrá pretender dominar en todas sus facetas.

Lo más difícil para el arquitecto será alcanzar aquellos conocimientos referentes a la estática que lo capaciten para formular ideas estructurales y proponer sistemas de estructuras. Pues, para él, la estática es solamente una de las muchas disciplinas que ha de dominar. Para salvar esa dificultad, el único medio es concentrar el volumen de conocimientos sobre estructuras en un ámbito en el cual pueda ser dominado y abarcado por el arquitecto.

El camino tradicional para tales intentos es enseñar solamente la primera parte de lo que constituye un programa concebido por ingenieros y enseñado a ingenieros. Aunque este método puede aportar conocimientos sobre conceptos básicos del comportamiento estructural y dar reglas para calcular las estructuras más simples, no será suficiente para establecer relaciones precisas entre estructuras arquitectónicas y el espacio y la forma arquitectónicos. Podrá dar recetas de cómo analizar un determinado sistema estructural, pero no estimulará la facultad de concebir y desarrollar nuevos sistemas. Y el resultado de este método será un ingeniero aficionado, inseguro de sí mismo en materias de proyectos estructurales y con una actitud sobre el tema, mezcla del recelo y de la aversión que acompañan siempre a la ignorancia.

Se ha conseguido una mejora notable analizando la escasez e insuficiencia de conocimientos del arquitecto en ejercicio, respecto de las materias estructurales, y, en consecuencia, ampliando y enriqueciendo el temario convencional en la esperanza de remediar la situación actual. Sin embargo, una tal mejora, que se basa sólo en la observación de pequeñas deficiencias de la práctica cotidiana, no resolverá el dilema de la formación científica del arquitecto contemporáneo. Pues la función del proyecto estructural, dentro de la creación arquitectónica, no ha cambiado o se ha desarrollado simplemente, sino que es fundamentalmente nueva.

1. En el pasado, el vocabulario del proyecto estructural se hallaba reducido a relativamente pocos sistemas normalizados y técnicas artesanas, los cuales limitaban las posibilidades de forma y luces y ejercían un saludable control.

   En la actualidad, la ciencia de la imaginación y la técnica de la maquinaria han desplazado las barreras naturales de las posibilidades en el campo estructural. Casi todas las formas pueden construirse, y puede conseguirse que cualquier contradicción estructural pueda sostenerse, resistir y durar.

2. En el pasado, el conocimiento de una forma estructural correcta era empírica y vaga. Además, la técnica artesana favorecía la modificación personal de la forma normalizada.

   En la actualidad, tanto la teoría matemática como la ténica artesana prescriben de un modo preciso la forma y expresión estructurales, permitiendo la desviación individualista solamente a expensas de la economía. Las formas estructurales se han convertido en absolutos e indispensables standards de la Arquitectura.

3. En el pasado, la falta de variedad en los sistemas estructurales bien conocidos coartó la libre realización de las ideas del arquitecto. Era inevitable un lapso entre la estructura posible y la forma arquitectónica, y escasa la economía.

   En la actualidad, innumerables estructuras bien experimentadas permiten que cualquier espacio pueda ser sincronizado de un modo preciso con una forma estructural positiva que refuerce la idea arquitectónica. Forma estructural y espacio envolvente poseen una tolerancia muy reducida pudiendo incluso alcanzar la identidad.

4. En el pasado, el sistema estructural de un edificio desempeñaba sólo una parte menor e indirecta en la expe-

riencia estética de la Arquitectura. Una estructura sin ornamentar era raramente empleada como forma estética per se o experimentada como tal.

En la actualidad, el hombre deriva cada vez más la sensación estética de la pura comprensión intelectual de un sistema lógico, y de ahí que experimente la lógica de la forma estructural como fuente de sensación estética.

5. En el pasado, había pocos edificios importantes y, a causa de su importancia social, su proyecto estaba apenas ligado a consideraciones económicas y la elección de su esquema estructural no se hallaba limitado.

   En la actualidad, la civilización masiva necesita una cantidad sin cesar en aumento de edificios de múltiples unidades y grandes proporciones, y habiendo de sujetarse su construcción a un presupuesto afinado, y necesitando una enorme resistencia estructural, el concepto estructural es de preeminente importancia para el espacio y la función del edificio; de aquí que se trate realmente de una cuestión primaria del proyecto arquitectónico.

Esta nueva significación de las estructuras para el edificio y su proyecto nos lleva a la necesidad de enfocar nuevamente y reconsiderar las cuestiones básicas que subrayan los conceptos «estructura arquitectónica» y «proyecto de estructura». El análisis de lo que es en esencia una estructura técnica y de la función que la estructura desempeña en la creación arquitectónica proporcionará una base sólida para proponer la cuestión: qué debe saber el arquitecto sobre estructuras y en qué grado.

Estructura técnica: medios de humanización

Todas las tareas del hombre —cuando son algo más que la mera aseguración de la existencia, el incremento de la comodidad y la satisfacción egoísta— tienden a imponer la medida del hombre sobre el entorno de éste, de modo que armonice con su vida física y espiritual, refleje su imaginación y pueda elevar su existencia: humanización del ambiente.

Este ambiente comprende los elementos visibles e invisibles, los seres animados e inanimados, el mundo terrestre y el extraterrestre. El ambiente es también el prójimo. El hombre se halla constantemente en proceso de transformación, confiando en mejorar el ambiente existente mediante la agricultura, la construcción, los descubrimientos, la educación y la política, así como por medio de la explotación o el empleo de la fuerza. El hombre humaniza el ambiente y, cuando lo ha conseguido, trata de humanizarlo más todavía, hasta alcanzar altos niveles.

Toda humanización es, en esencia, una extensión de la estructura intelectual. El hombre, antes de intentar coordinar el ambiente con su propio ser, considera lo que es necesario realizar a tal propósito, y lo ordena según un sistema de interdependencias; configura una estructura intelectual para sus actos; en definitiva, se traza un plan, y una tal estructura intelectual, fundamentada en otra dada por la naturaleza, se convierte en una estructura técnica.

Por tanto, técnica es cualquier estructura del ambiente humanizado que produce y preserva una forma. Esto quiere decir que una estructura técnica debe considerarse no tanto como construcción material cuanto como estructura intelectual aplicada. Estructura técnica es lo que distingue el lenguaje del mero sonido y abre el camino a la poesía y a la música; estructura técnica es la que convierte el agua en energía y la materia en Arquitectura. Y técnica es también la estructura que soporta la existencia del hombre civilizado y la distingue de la del salvaje.

La estructura técnica, por tanto, no es sólo el instrumento esencial para humanizar el ambiente total, sino también el criterio de cualquier forma humanizada.

El papel que la estructura técnica desempeña en la formación de la Arquitectura se halla asociado íntimamente con la función de ésta: la creación de espacio humanizado. Solamente mediante una estructura puede extenderse el espacio, de forma que se pueda desarrollar en él la vida del individuo, la familia o la sociedad; por medio de la estructura puede controlarse el espacio para que sea posible vivir a salvo, moverse y trabajar; y también por medio de la estructura este espacio puede enriquecerse y ser dotado de escala y de calidad estética. La estructura es, pues, algo instrumental e integral para el espacio arquitectónico.

Los primitivos edificios eran meras estructuras y el espacio estaba casi totalmente determinado por el sistema estructural. Pero, a lo largo de la historia, la contribución proporcional de la estructura dentro del conjunto de factores arquitectónicos ha sido sometida a interpretaciones muy diferentes. Algunas épocas subordinaron los sistemas estructurales a las ideas espacio-formales, hasta un punto en el que la estructura se hallaba sumergida en la abundancia de un volumen formalístico; otras épocas, de un modo indiscriminado, adoptaron la forma y el espacio que dictaba el sistema estructural, y, de nuevo, otras épocas hallaron placer en el empleo de formas seudoestructurales que servían solamente al sentido de la vista y no a la cobertura del espacio.

Pueden existir discrepancias respecto al modo de juzgar los méritos y deméritos de esos puntos de vista extremos considerando el papel que desempeña la estructura en la Arquitectura; pero no puede haber duda respecto a la comprobación que, a través de la historia, los ingenios o mecanismos encaminados a cubrir el espacio, es decir, los sistemas estructurales, estimularon a los arquitectos y constructores en sus creaciones e influyeron en la forma y en el espacio

arquitectónico. Es incluso probable que fuese, frecuentemente, la necesidad de un nuevo sistema estructural lo que adujera nuevos conocimientos sobre la manipulación del espacio, y no es accidental que las características más destacadas del espacio y de la forma en la Arquitectura contemporánea sean un resultado, más bien de la ingeniería estructural que del proyecto arquitectónico.

Aquí se requiere una afirmación muy precisa: cierto que es la estructura calculada, tal como sucede en los puentes, puertos, autopistas o factorías industriales, la que se ha convertido en muchos casos en el producto final, es decir, en la construcción definitiva que controla el espacio en el que vive la sociedad; y, sin embargo, la función adecuada de la estructura es sólo medio, no fin; es instrumento y no producto. Si la Arquitectura es el ambiente material humanizado que, además de satisfacer las necesidades físicas del hombre, exige y protege la «humanitas» de éste, entonces, conseguir salvar una distancia mediante un puente, una cubierta o una carretera y obtener seguridad y economía, puede ser sólo un medio y no un fin.

Indudablemente, existen muchos edificios proyectados por ingenieros que pueden ser considerados ejemplos destacados de buena arquitectura. Pero la excelencia de esas construcciones no es debida a la calidad de su sistema estructural, sino a que han logrado el éxito engendrando un espacio arquitectónico. Y esos ingenieros proyectistas no sobresalen por su capacidad técnica específica, sino por su intuición arquitectónica, que les permite llevar sus ideas estructurales a una correcta dependencia respecto del objetivo arquitectónico.

Esas construcciones de ingeniería tan conseguidas confirman, a su modo, pero no por ello menos claramente, que la estructura arquitectónica adquiere una realidad y una significación por medio de la función que desempeña. Y esta función consiste en hacer posibles las formas materiales que sirven para el ser físico y espiritual del hombre. Su mérito puede calibrarse exclusivamente según el acierto con que realicen esa función.

Necesidad de la estructura: conflicto de las direcciones

La estructura es una necesidad para la Arquitectura: sin estructura no hay Arquitectura. Sin embargo, la necesidad de la estructura tiene su propia y única causa y esta causa resulta de un conflicto de direcciones, o más bien de varios conflictos que han de ser resueltos para poder engendrar un espacio para la vida y el trabajo humanos.

Estos conflictos direccionales tienen una cosa en común: se hallan todos subordinados a un fenómeno que, si no existiera, haría superfluos los sistemas estructurales, o al menos se necesitarían otros esencialmente diferentes de los conocidos hasta el presente. Este fenómeno es el peso. El peso, por otra parte, no es sino una fuerza que es ejercida por la masa de la Tierra. La atracción terrestre, por tanto, es la razón final de los problemas del proyecto estructural. Y esta atracción es un elemento integral de la estructura en la Arquitectura.

Sin la presencia continua de la gravedad, las estructuras materiales, tales como las conocemos en la Tierra, las técnicas y las naturales, carecerían de sentido y muy probablemente no existirían. La acción continua de esta gravedad sobre el edificio, como sobre toda sustancia, no es de ningún modo una condición tan inevitable como parece. En la era de la aviación y de la intrusión del hombre en el espacio, una Arquitectura con estructuras no sujetas a la atracción terrestre entra de lleno en lo posible y razonable.

En la Tierra, sin embargo, toda sustancia posee un peso, y este peso se convierte en un problema en cualquier parte en donde la sustancia no se halla conectada con la Tierra directamente y del modo más directo. Este es el caso cuando el espacio está cubierto horizontalmente por medios materiales o cuando se vacía una masa sólida para crear un espacio libre. Precisamente, ese espacio rodeado de materia es el objetivo de la edificación y la esencia de la Arquitectura.

De esto puede concluirse que no es solamente el peso lo que requiere sistemas estructurales para cubrir espacios, sino también el conflicto básico que existe entre las direcciones del movimiento del hombre y la gravedad terrestre. La constitución física del hombre, y también su sentido de la orientación, están dispuestos predominantemente para el movimiento horizontal. Su vida se desarrolla en un plano horizontal, entrando, por tanto, en conflicto con la dinámica vertical de toda sustancia.

También se produce un conflicto entre las direcciones de fuerzas por las acciones horizontales que actúan sobre el edificio, tales como el viento. Aquí la dirección de las fuerzas exteriores se halla en conflicto con la expansión vertical del espacio interior y con la dirección excéntrica de la resistencia que ofrece el anclaje. A partir de una determinada altura sobre la Tierra puede resultar ese conflicto direccional tan crítico que sus consecuencias estructurales pueden sobrepasar ampliamente las causadas por la gravedad, convirtiéndose la estabilidad lateral en el problema principal del proyecto estructural.

También pueden producirse conflictos por fenómenos, tales como la expansión térmica (y la contracción), el envejecimiento del material o el asiento de las cimentaciones. Naturalmente, esos cambios afectarán inevitablemente a cualquier sustancia material, pero se convierten en problemas estructurales cuando ocurren en una dirección que se halla en conflicto con la expansión del espacio o con la dirección de la fuerza resistente.

El proyecto estructural resuelve estos conflictos direccionales obligando a las

fuerzas a cambiar su dirección, de manera que el espacio para el movimiento humano quede sin obstruir en un amplio campo. En qué grado de imaginación se realiza este encauzamiento de las fuerzas y en qué grado la estructura es capaz de reforzar el concepto funcional, social y estético del espacio que cubre es lo que constituye la medida de la calidad de la estructura arquitectónica.

El proyecto estructural, por tanto, es no solamente un método para obligar a las fuerzas a cambiar de dirección, sino también un arte.

A través del proyecto estructural las acciones gravitatorias, las fuerzas exteriores y las tensiones internas son sometidas a control y canalizadas por caminos prescritos; la intención es introducirlas en un sistema de acciones y reacciones interdependientes que establezca un equilibrio dentro de cada componente individual, así como en el sistema estructural, considerado en su totalidad. El proyecto estructural impide a estas fuerzas reunirse en una concentración destructiva, y las mantiene a raya.

El proyecto estructural es estrategia, es la planificación intelectual de un sistema dinámico para dominar un conjunto de fuerzas. La magnitud de las tensiones depende en alto grado de la clase de estrategia empleada; esto es válido también para las fuerzas resistentes que han de desarrollarse. En realidad, el proyectista, al plantear un sistema estructural se siente en el papel de un general que ha de hacer frente a las diversas fuerzas del enemigo, y tiene que concebir un plan estratégico para poder controlarlas. El modo de aniquilar las fuerzas adversarias, de emplear las propias, el ingenio del esquema táctico y el alcance que pueda tener para la acción conjunta, es lo que distingue al planificador mediocre del genial, ya sea de carácter militar o técnico.

La estrategia del proyecto estructural es polifacética, conforme al carácter específico que cada una de las estrategias particulares pueda expresar: las superficies curvadas, que distribuyen en su interior las fuerzas, de manera que la tensión se reduce hasta adquirir magnitudes inofensivas (láminas); los ligeros sistemas articulados que descomponen las fuerzas según diversas direcciones en las cuales pueden ser resistidas (cerchas); la flexible ligereza que doblega el camino natural de las fuerzas llevándolas hasta aquellos puntos en los cuales ya no pueden ser nocivas (cubiertas colgantes); la pesada masa que pone en acción el brazo de palanca de los materiales sólidos, modificando poderosamente la dirección de las fuerzas para alejarlas de todas las zonas críticas (estructuras flectadas). Fundamentalmente, todas son artilugios para controlar las fuerzas; pero la realidad es que se dan en la variedad, intensidad y universalidad de esas expresiones todos los requisitos necesarios para que sean también formas artísticas.
Al final, sin embargo, todas esas fuerzas serán reducidas y conducidas al suelo; a esa aparente masa sólida de la Tierra donde no existirá ya conflicto de direcciones, ya que allí no hay espacio para el movimiento.

Conocimiento de la estructura: extensión y contenido

Sobre la base de los principios anteriormente expuestos, la cuestión de la extensión y del contenido de los conocimientos exigidos al arquitecto para proyectar estructuras puede ya contestarse de un modo preciso. Porque, ya que es sabido que la esencia del proyecto estructural consiste en el desarrollo de un sistema de forma material que desvía las fuerzas hacia determinadas direcciones y las lleva al suelo con la máxima eficiencia estética y material y con una mínima obstrucción del espacio, el conocimiento que ha de poseer el arquitecto sobre el tema deberá concentrarse preferentemente en:

— Conocimiento del mecanismo que hace cambiar a las fuerzas de dirección.

— Conocimiento de los sistemas para cubrir espacios y resistir deformaciones.

Esta meta no solamente conduce a una sana limitación del vasto campo de la estática, sino que permite establecer también una organización simple y conveniente de los sistemas estructurales arquitectónicos:

1. Estructuras que actúan principalmente mediante su forma material:
   — sistemas de forma activa o sistemas estructurales en estado de tracción o compresión simples.

2. Estructuras que actúan principalmente mediante la colaboración de los miembros en compresión y tracción:
   — sistemas de vector activo o sistemas estructurales en estado de tracción y compresión, ejercidos simultáneamente.

3. Estructuras que actúan principalmente debido a la masa y continuidad de la materia:
   — sistemas de masa activa o sistemas estructurales en estado de flexión.

4. Estructuras que actúan principalmente mediante su continuidad superficial:
   — sistemas de superficie activa o sistemas estructurales en estado de tensión membrana.

5. Estructuras que actúan principalmente mediante transmisión vertical de las cargas:
   — sistemas estructurales verticales.

Apenas existe, sin embargo, un sistema estructural que actúe exclusivamente en razón de su característica más acusada. Un arco funicular, por ejemplo, aunque logre fundamentalmente su cualidad resistente mediante esfuerzos de forma activa, necesita disponer de una cierta cantidad de resistencia de masa activa

para enfrentarse con las cargas móviles o asimétricas. Lo mismo sucederá con una estructura de superficie activa que no sólo requerirá resistencia de masa activa contra flexiones secundarias, sino que también deberá poseer mucho carácter de forma activa, sin el cual las fuerzas no podrían estar contenidas en su superficie media, requisito indispensable para este tipo de estructuras.

En realidad, en cada sistema estructural hay que hallar, al lado de su característica esencial, una combinación de cualidades distintivas de otros sistemas estructurales. Sin embargo, si se considera la principal acción resistente, esto es, el mecanismo dominante para la modificación de las direcciones de las fuerzas, cada estructura puede clasificarse fácilmente en una de esas cinco familias de sistemas estructurales. Esta clasificación tiene otra justificación, ya que la forma y el espacio se hallan menos influenciados por esas cualidades secundarias y alcanzan carácter y propiedad, predominantemente, por el sistema que consigue la mayor cobertura del espacio; aquellas cualidades secundarias pueden ser ignoradas en el concepto estructural inicial de un edificio, así como en la discusión teórica de los sistemas estructurales.

Esto posibilita también colocar las estructuras de edificios de altura en la categoría de sistemas estructurales verticales. Pues la misión primordial de esas estructuras es la conducción de las cargas verticales, viniendo dada su máxima diferenciación por los sistemas particulares de reunión y transmisión de fuerzas, así como por la estabilización lateral; prescindiendo de que esos sistemas han de emplear necesariamente, para encauzar las fuerzas, uno de los mecanismos pertenecientes a algunos de los cuatro sistemas anteriormente enumerados.

De acuerdo con estos esquemas, pueden hacerse accesibles al arquitecto las innumerables posibilidades estructurales y disponerlo para su completa comprensión. Ya que estos esquemas se hallan organizados exclusivamente sobre la base de los principales sistemas que pueden hacer cambiar de dirección a las fuerzas, puede esperarse que el arquitecto sea experto precisamente en esta fase de la concepción estructural que, por su alta significación para el espacio arquitectónico que forma, no se refiere tanto al campo del ingeniero de estructuras cuanto al que pertenece a la función primaria del arquitecto. En realidad, el dejar o transferir esta función a otros llevaría al arquitecto a la necesidad de abandonar el proyecto totalmente.

Conocimiento de las estructuras: método y medios

La elección del método y medios de cómo pueden difundirse con mayor eficacia los conocimientos sobre sistemas estructurales se regirá por las características particulares de lo que se ha de difundir, y a quién. Entre estas características, las tres siguientes son obligadas:

— La naturaleza predominantemente gráfica del lenguaje del arquitecto.
— La esencia físico-mecánica del objeto considerado.
— La orientación de todos los esfuerzos arquitectónicos hacia la forma y el espacio.

Estas circunstancias han promovido el intento de presentar los rudimentos y el comportamiento de los sistemas estructurales por medio de esquemas y modelos fotográficos, limitando el texto a un mínimo. Sin duda alguna, un mecanismo que cubre el espacio y resiste deformaciones puede explicarse mejor por medios gráficos que por palabras o fórmulas matemáticas.

Hablando estrictamente, el proceso de proyectar un sistema estructural comprende las fases siguientes:

Delineación de la forma estructural básica, dimensionamiento global de sus componentes, introducción de rigidez lateral, comprobación de los posibles efectos debidos a variaciones térmicas, asientos de cimentación, condicionamiento de las cargas y envejecimiento y, finalmente, elección del material de la estructura del método constructivo. Ninguno de estos pasos diferenciados para desarrollar un sistema estructural requiere el empleo de fórmulas matemáticas. Es decir, ninguna fase de la formulación de una idea estructural depende del empleo de las matemáticas. Solamente después de hahaber examinado todas las fases por separado y haber concebido, en consecuencia, el sistema estructural en sus elementos esenciales pueden y deben aplicarse fórmulas matemáticas para comprobar el sistema, dimensionar con precisión sus componentes y garantizar de ese modo su seguridad y economía.

Se ha reconocido que algunos rudimentos de los conceptos sobre estructuras, tales como resistencia, brazo de palanca, centro de gravedad, momento de inercia o equilibrio, pueden entenderse mejor si se emplea el álgebra elemental. Pero se discute si el conocimiento del análisis matemático estructural es requisito para poder adentrarse en el comportamiento de las estructuras o si tal conocimiento estimulará la aplicación creadora de los conceptos estructurales.

Concentración en lo sustantivo y eliminación de lo accidental constituyen otros requisitos para poner de manifiesto la verdadera esencia de un ramo del saber polifacético. En la representación gráfica de los sistemas estructurales abstractos, ambos requisitos pueden satisfacerse fácilmente. No sucede así en la reproducción fotográfica de los edificios actuales, ya que en la práctica arquitectónica se da pocas veces el caso de que la forma ideal del sistema estructural no necesite ser alterada y su potencial espacial no haya de ser restringido, con el fin de atender a los muchos problemas que la edificación plantea en la práctica.

Un camino preferible, por tanto, consiste en excluir la reproducción de los edificios

actuales y, en su lugar, presentar modelos de sistemas estructurales típicos. El principal objetivo de estos modelos es producir el potencial de los sistemas estructurales para la forma y el espacio arquitectónicos y establecer así un nexo directo con aquello que constituye la manifestación de la Arquitectura. Por esta razón los modelos no son modelos de ensayo, en el sentido ingenieril y de ahí que tampoco sean un sustitutivo para el análisis de modelos.

Esquema, maqueta y fotografía se sirven conscientemente, y en gran medida, de la abstracción, del mismo modo que lo hacen los objetos que representan. Pues cualquier representación de índole más realista dependería de toda una serie de condiciones definidas y así se sacrificaría parte de la validez universal del ejemplo. También la delineación detallada de una propuesta estructural podría coartar el empleo original de una estructura en manos de un arquitecto de talento creador. Y es más, se han introducido en algunos dibujos figuras humanas no para establecer una escala fija, sino con objeto de crear la ilusión de espacio y edificio.

Para comprender el mecanismo de un sistema estructural no es necesario el establecimiento de una escala absoluta. Lo mismo se aplica al material de construcción. El funcionamiento básico (aunque no la magnitud de los esfuerzos y el ámbito de las luces posibles y económicas) de un sistema estructural es independiente de su magnitud o del material que lo constituye. Los mecanismos para una cubierta de hormigón de 7,5 metros de luz son esencialmente los mismos que para una de plástico de 15 metros de luz. Cualquier delimitación entre luz de tramo a cubrir y material constructivo necesitaría datos de proyecto definido. Esto privaría a la maqueta o tal esquema de generalidad, individualizándolos, y no añadirá nada para el entendimiento básico.

Del mismo modo, los métodos de construcción, detalles de uniones y estructuras secundarias para la cimentación y envoltura del espacio (incluso la rigidización lateral cuando no constituye parte integral del mecanismo resistente) ejercen escasa influencia en la forma estructural básica. Solamente después de la concepción de un sistema estructural es cuando adquieren significación estos criterios secundarios de proyecto. Hay factores de desarrollo estructural y no de concepto estructura inicial o de idea estructural. Por ello pueden ser excluidos.

Unmétodo tan exlusivo e intencionadamente unilateral conduce a una intensificación positiva y a una concentración del material total existente sobre estructuras. Desligado de consideraciones prácticas permitirá a la libre imaginación y al talento creador traspasar los límites de las estructuras ya bien experimentadas (y conocidas) para deducir formas nuevas y no convencionales. Estas formas no representan ESTRUCTURAS que puedan incorporarse sin más ensayos a la planta o a la sección de un proyecto, pero son SISTEMAS estructurales. Las ESTRUCTURAS son ejemplos y, por ello, MODELOS de proyecto. Los SISTEMAS estructurales son ordenaciones y, por ello, PRINCIPIOS de diseño.

Como sistemas, los mecanismos para volver a encauzar las fuerzas se alzan por encima del individualismo de una estructura proyectada sólo para una tarea específica y se convierten en un principio ordenador. Como sistemas, no se hallan ligados al actual estado de conocimiento sobre materiales y construcción ni a las condiciones locales particulares, sino que mantienen su validez independientemente del tiempo y del espacio.

Como sistemas, finalemnte, forman parte de un sistema de seguridad más amplio que el hombre ha creado para la conservación de su especie; tal como aquél, se halla embebido en ese otro sistema, al cual está subordinado tanto el movimiento de los astros como el del átomo.

Sistemas estructurales de forma activa

1

Una materia no rígida, flexible, con una determinada forma y asegurada mediante extremos fijos, puede sostenerse a sí misma y cubrir un espacio: sistemas estructurales de forma activa.

Son predecesores de los sistemas estructurales de forma activa el cable colgante vertical, que transmite la carga directamente al punto de suspensión, y la columna vertical, que, en dirección opuesta, transfiere la carga directamente a su pie.

La columna vertical y el cable colgante vertical son prototipos de sistemas estructurales de forma activa. Transmiten cargas solamente mediante simples tensiones normales; es decir, mediante compresión o tracción.

Dos cables con diferentes puntos de suspensión forman conjuntamente un sistema de suspensión, el cual puede extenderse por el libre espacio y transmitir las cargas lateralmente mediante puras tracciones.

Un cable de suspensión invertido forma un arco funicular. La forma ideal de un arco para unas condiciones de carga determinadas es el correspondiente funicular de tracción para las mismas cargas.

La característica de los sistemas estructurales de forma activa es, pues, que ellos vuelven a encauzar las fuerzas exteriores por medio de simples tensiones normales: el arco, por compresión; el cable colgante, por tracción.

Los sistemas estructurales de forma activa desarrollan esfuerzos horizontales en sus extremos. La recepción de esos esfuerzos constituye un problema esencial al proyectar estos sistemas.

El mecanismo resistente de los sistemas de forma activa descansa esencialmente en la forma material. La desviación de la forma correcta, si es posible, compromete la función del sistema o requiere mecanismos adicionales que compensen dicha desviación.

La forma de los sistemas estructurales de forma activa coincide, en el caso ideal, precisamente con el flujo de los esfuerzos, y estos sistemas son, por tanto, el camino «natural» de las fuerzas expresado en materia.

La trayectoria «natural» de los esfuerzos de un sistema de compresión de forma activa es el funicular de las compresiones y la de las de un sistema de tracción es el de las tracciones. La línea de compresiones y la de tracciones se hallan determinadas, de un lado, por las fuerzas que trabajan en el sistema, y de otro, por la flecha y la distancia de los extremos.

El funicular de los esfuerzos de compresión y el de los de tracción constituyen la segunda característica de los sistemas estructurales de forma activa.

Cualquier cambio en las condiciones de carga o sustentación afecta a la forma de la curva funicular y da origen a una nueva forma estructural. Mientras que el cable de las cargas, como un sistema que flexa bajo nuevas cargas, adopta él mismo una nueva línea de tracciones, el arco, como un sistema «resistente», ha de compensar la modificación de la línea de presiones mediante la correspondiente rigidez (mecanismos resistentes a flexión).

Ya que el cable colgante cambia su forma bajo las diferentes cargas, es siempre la curva funicular para la carga existente. Por otra parte, el arco, ya que no puede cambiar su forma, puede ser funicular solamente para un determinado condicionamiento del sistema de cargas.

Los sistemas estructurales de forma activa, a causa de su dependencia de las condiciones de carga, son gobernados estrictamente por la disciplina del flujo «natural» de las fuerzas, y por ello no pueden llegar a someterse al proyecto arbitrario y libre de la forma. La forma y el espacio arquitectónico son el resultado del mecanismo sustentante.

La ligereza del flexible cable colgante y la pesadez del arco rigidizado contra una variedad de cargas adicionales son deméritos arquitectónicos de los sistemas estructurales de forma activa. Pueden ser eliminados en gran parte pretensando los sistemas.

Así como el cable colgante puede estabilizarse por el pretensado de tal manera que sea capaz de ser sometido a fuerzas adicionales que también estén dirigidas hacia arriba es igualmente posible precomprimir el arco hasta un grado tal qúe pueda volver a dirigir las cargas asimétricas sin experimentar flexiones críticas.

El arco y el cable colgante, a causa de ser solicitados exclusivamente por simple compresión o tracción, son los sistemas más económicos para cubrir un espacio, atendiendo a la relación peso-luz.

A causa de su identificación con el flujo «natural» de las fuerzas, los sistemas estructurales de forma activa son los mecanismos más convenientes para alcanzar grandes luces y configurar amplios espacios.

Puesto que los sistemas estructurales de forma activa conducen las cargas por el camino más directo posible son en efecto y en esencia, vigas lineales.
Esto es cierto también para las redes de cables, membranas o cúpulas de celosía, en las cuales las cargas, aun estando dispersas según más de un eje, se transmiten también en forma lineal a causa de carecer de mecanismo cortante.

Los elementos estructurales de forma activa pueden utilizarse para formar estructuras superficiales. Si ha de mantenerse la condición de estado simple de tensiones, característica de estos sistemas, también deberán someterse a las reglas del funicular de presiones o tracciones.

El arco y el cable colgante, sin embargo, no son solamente la esencia material de los sistemas estructurales de forma activa, sino la idea elemental para cualquier

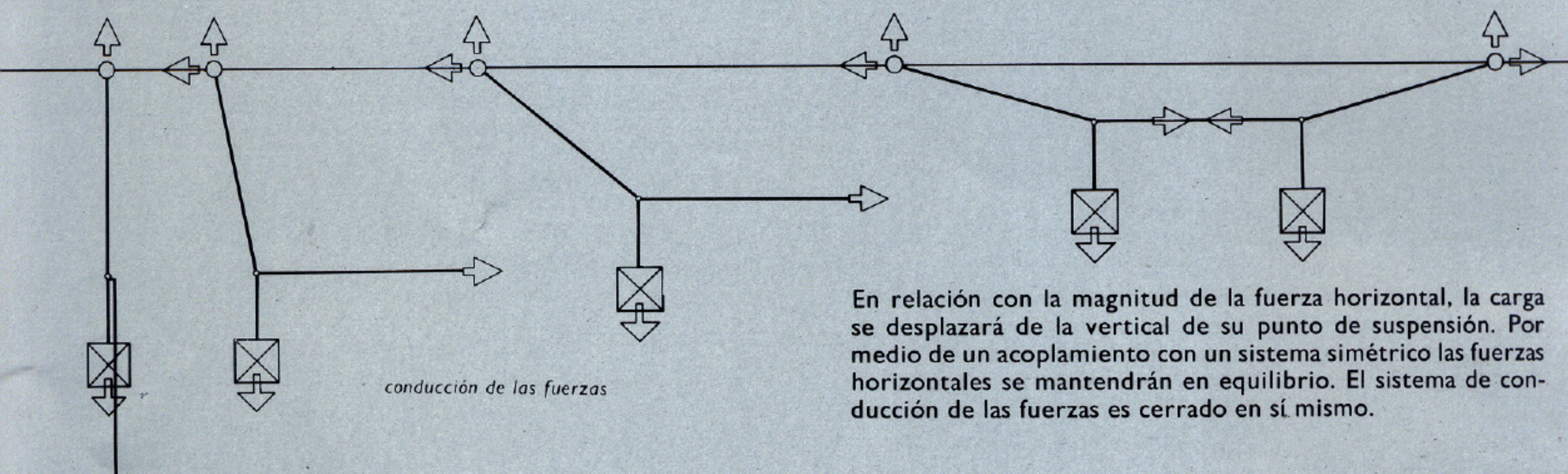
mecanismo sustentante y, en consecuencia, el verdadero símbolo de la medida técnica del espacio realizada por el hombre.

Las cualidades de la forma activa pueden darse en cualquier otro sistema estructural. Especialmente en los sistemas estructurales de superficie activa constituyen un elemento esencial para el funcionamiento del mecanismo sustentante.

Los sistemas estructurales de forma activa, a causa de su aptitud para cubrir espacios de luces considerables, adquieren un significado especial para una civilización de grandes masas que exige espacios de grandes dimensiones. Constituyen un potencial de formas estructurales para la edificación futura.

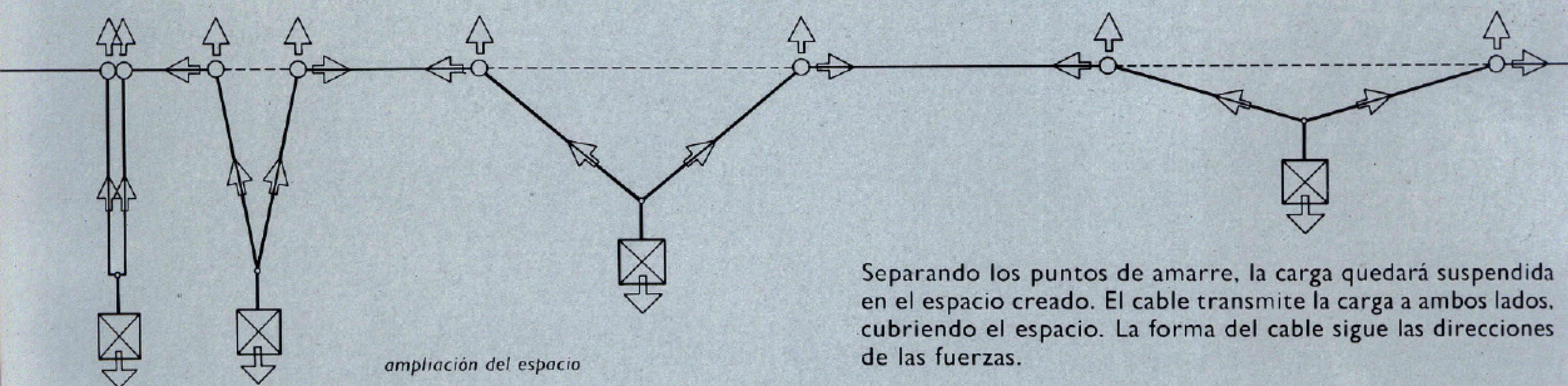
El conocimiento de las leyes de canalización de las fuerzas en las formas activas es requisito para el proyecto de cualquier sistema estructural y, por ello, esencial para el arquitecto que desee proyectar un edificio.

Relación entre la dirección de la fuerza y la forma estructural del cable



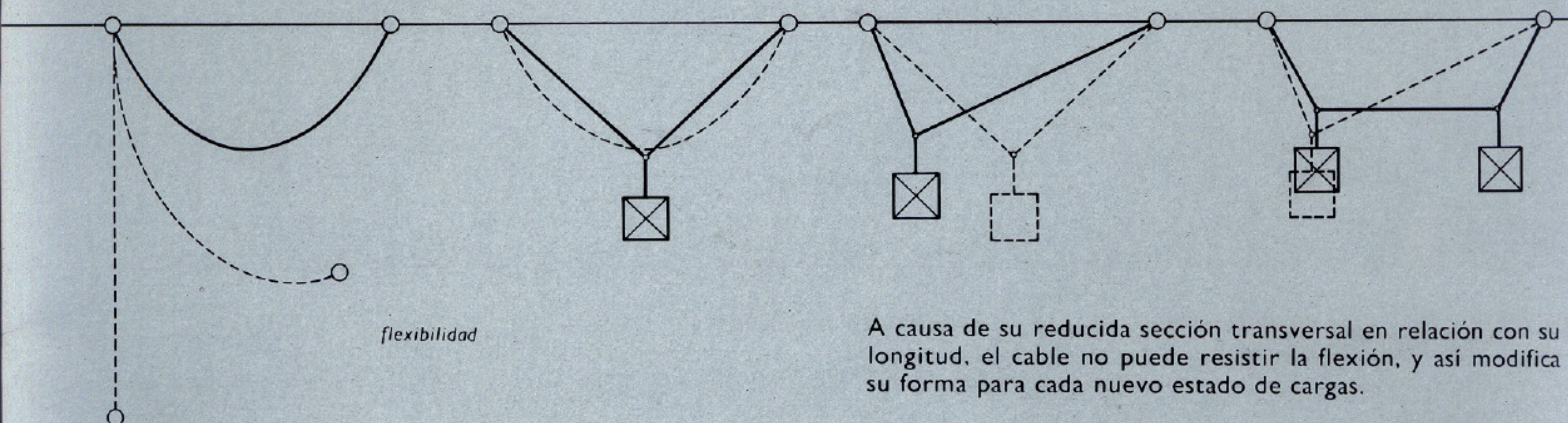
conducción de las fuerzas

En relación con la magnitud de la fuerza horizontal, la carga se desplazará de la vertical de su punto de suspensión. Por medio de un acoplamiento con un sistema simétrico las fuerzas horizontales se mantendrán en equilibrio. El sistema de conducción de las fuerzas es cerrado en sí mismo.



ampliación del espacio

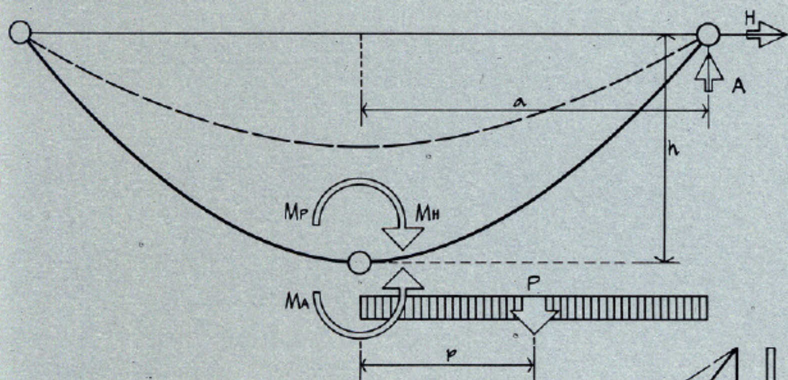
Separando los puntos de amarre, la carga quedará suspendida en el espacio creado. El cable transmite la carga a ambos lados, cubriendo el espacio. La forma del cable sigue las direcciones de las fuerzas.



flexibilidad

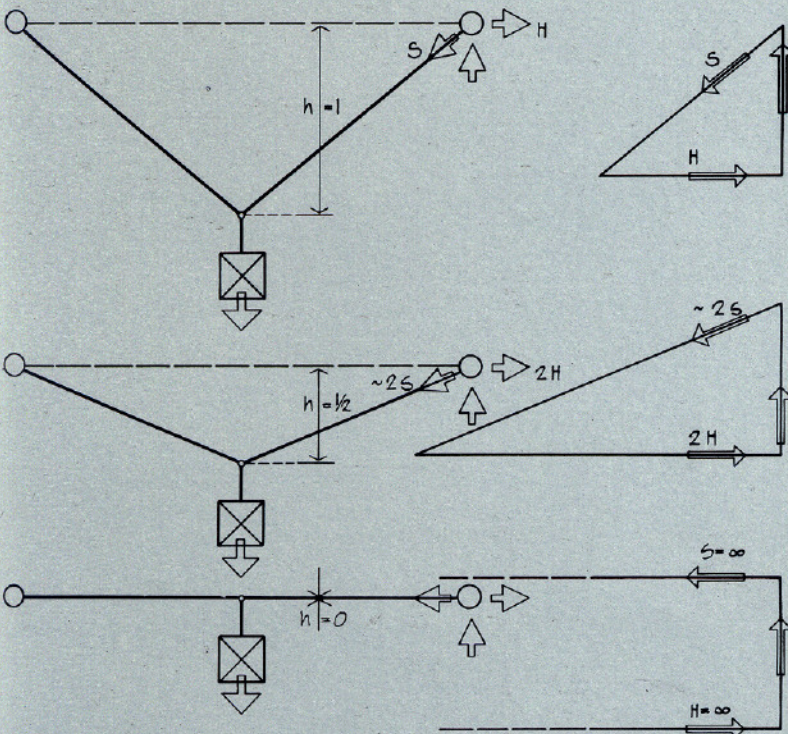
A causa de su reducida sección transversal en relación con su longitud, el cable no puede resistir la flexión, y así modifica su forma para cada nuevo estado de cargas.

Mecanismo de palanca del cable colgante



Debido al momento de la reacción horizontal M_M, se compensa la diferencia entre los momentos M_P y M_A, eliminándose la flexión.

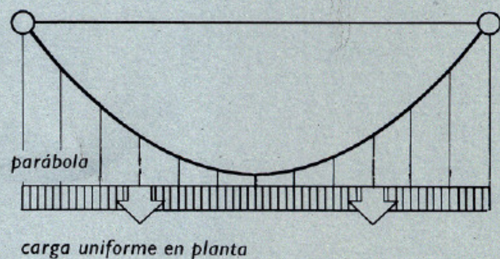
Influencia de la flecha en la distribución de esfuerzos

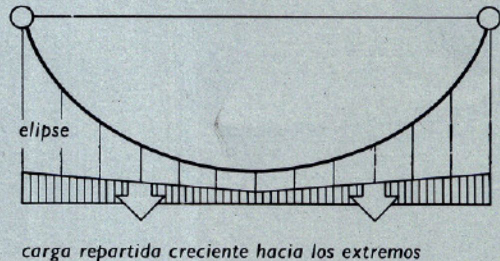


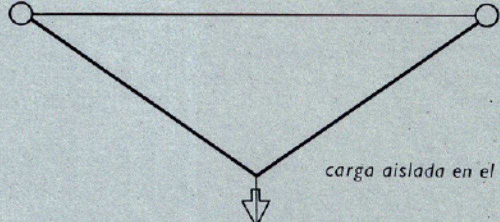
El esfuerzo S en el cable y la reacción horizontal H de un cable colgante son inversamente proporcionales a su flecha. Si la flecha es nula, el esfuerzo del cable y la reacción horizontal resultarán infinitos; es decir, el cable colgante no puede resistir la carga.

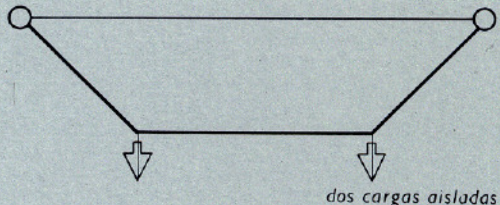
Forma geométrica del funicular

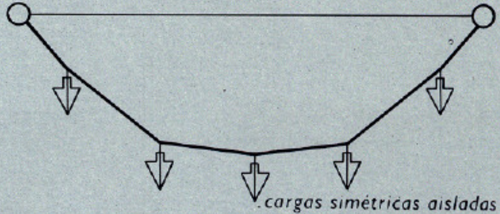




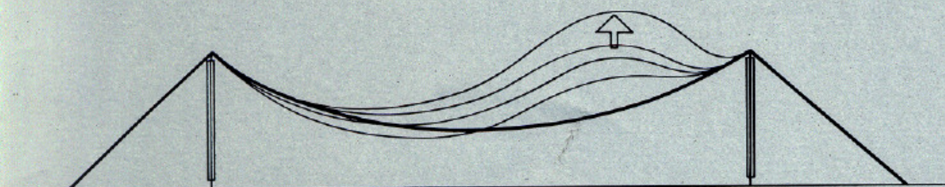








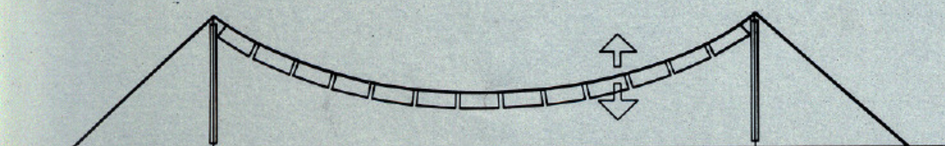
Deformaciones críticas del cable colgante



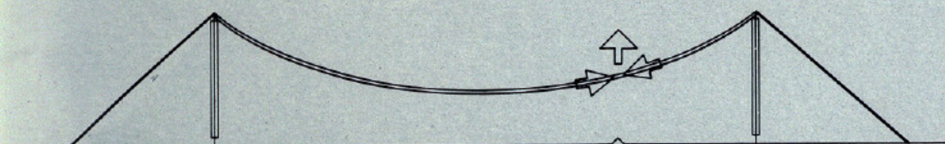


Debido a su reducido peso propio en relación a su luz, y a su flexibilidad, el cable colgante es muy susceptible a la succión del viento, a las vibraciones y a las cargas asimétricas y móviles.

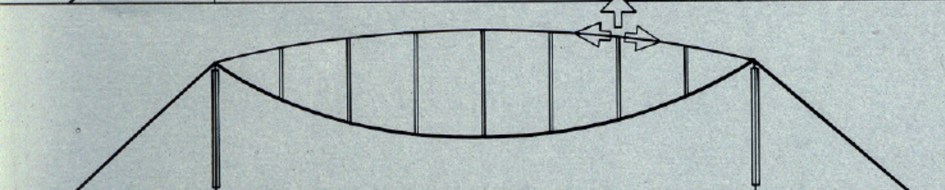
Estabilización del cable colgante



Incremento del peso propio.



Rigidización mediante construcción como arco invertido (o lámina)

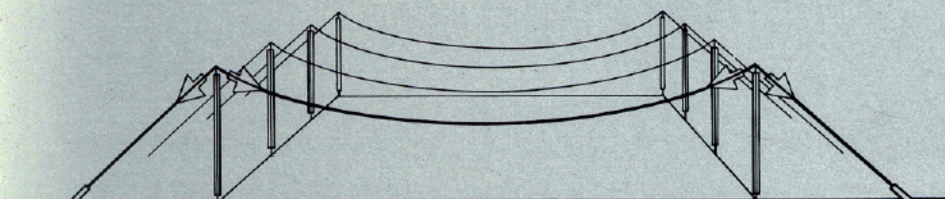


Tensado mediante un cable curvado en sentido opuesto.

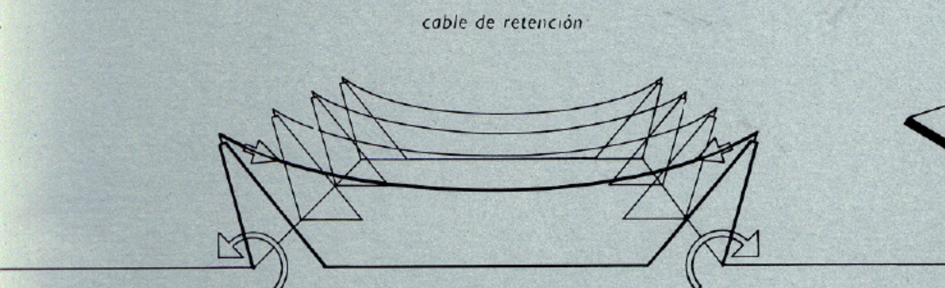


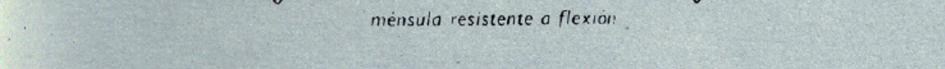
Tensado con cables transversales anclados al suelo.

Sistemas de retención para cables colgantes paralelos



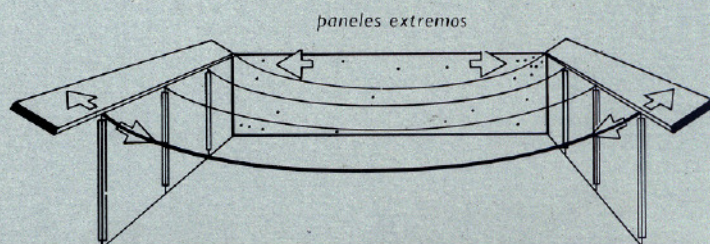
cable de retención





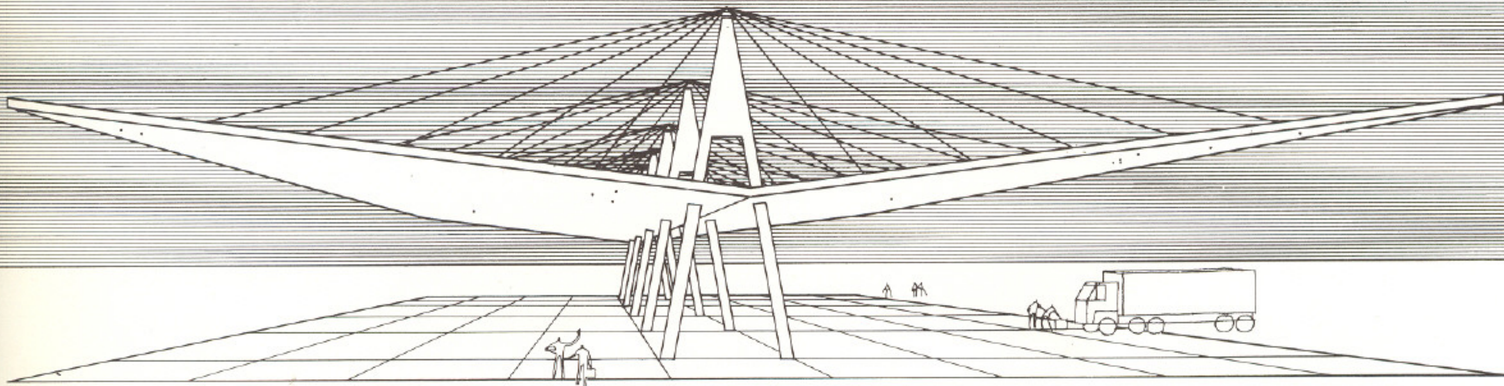
ménsula resistente a flexión

paneles extremos



viga horizontal

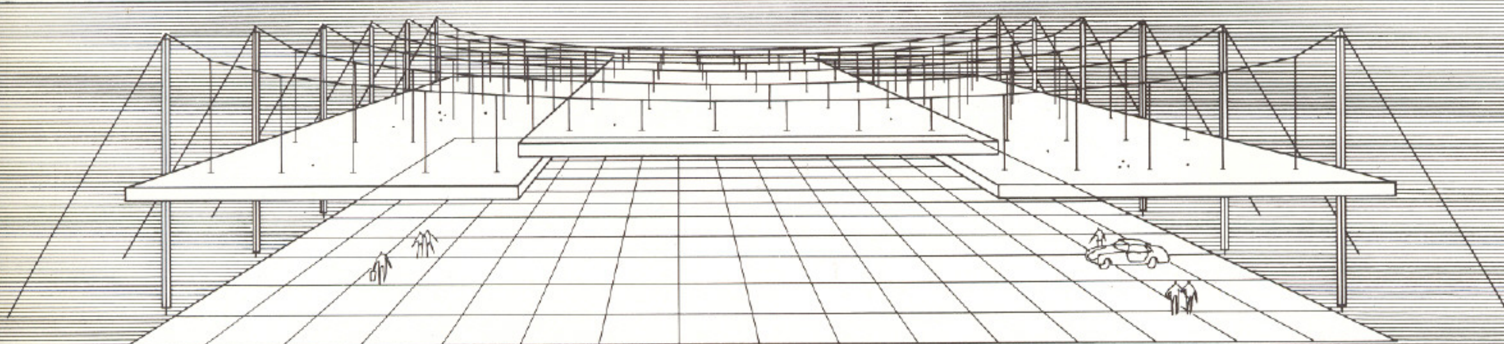
Sistemas simples paralelos, estabilizados mediante el peso de la cubierta



Suspensión directa desde el soporte central.

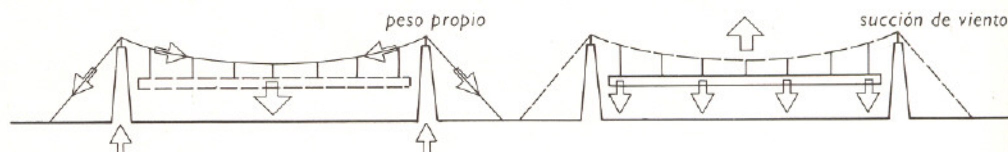
Mecanismo de suspensión y estabilización.

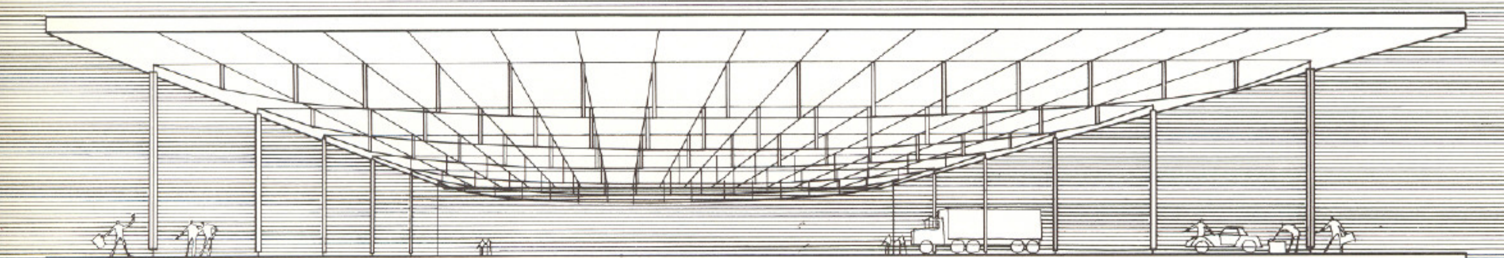




Cubierta suspendida del cable.

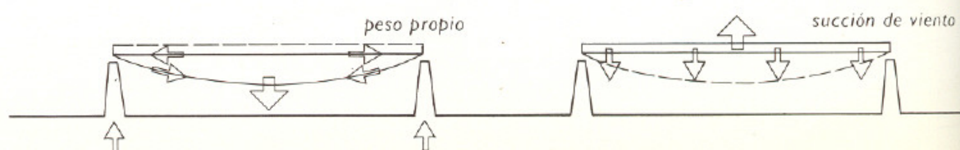
Mecanismo de suspensión y estabilización.





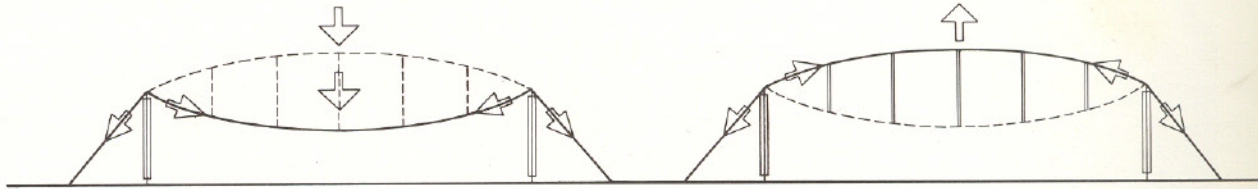
Cubierta apoyada en un cable colgante.

Mecanismo de suspensión y estabilización.

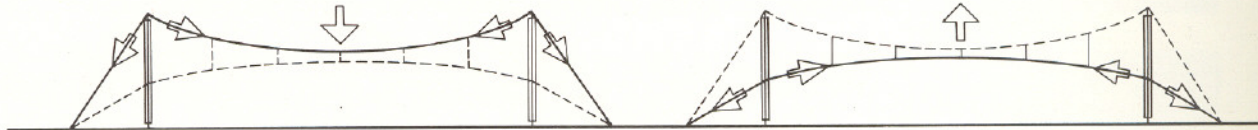


Mecanismo sustentante y estabilizador de los sistemas pretensados

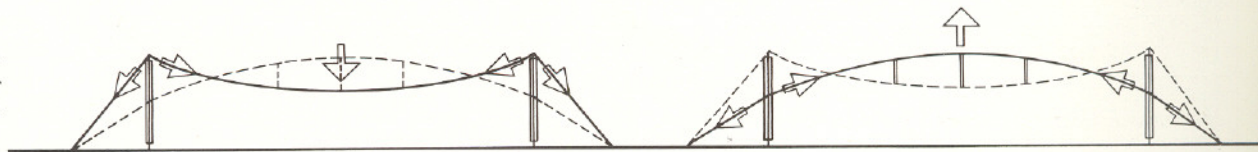
Cable portante por debajo del cable de estabilización.



Cable portante por encima del cable de estabilización.

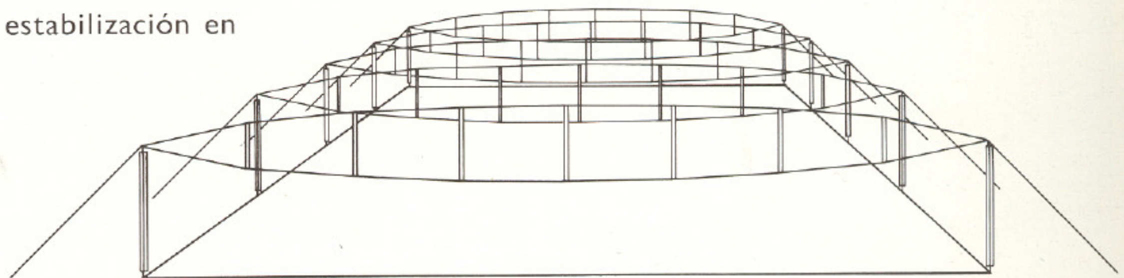


Cable portante, parte por debajo y parte por encima del cable de estabilización.

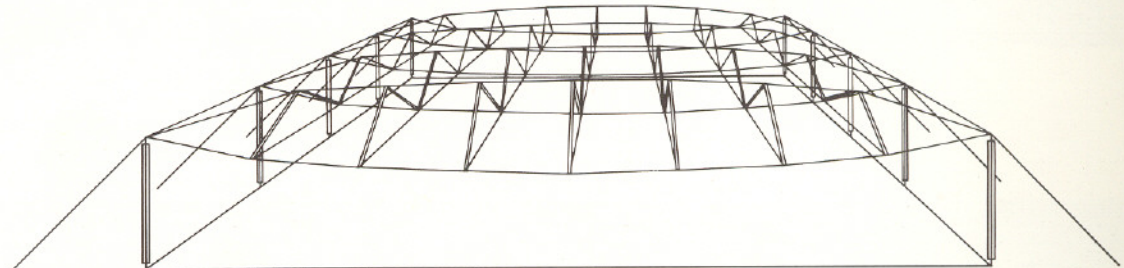


Mecanismo sustentante. Mecanismo estabilizador.

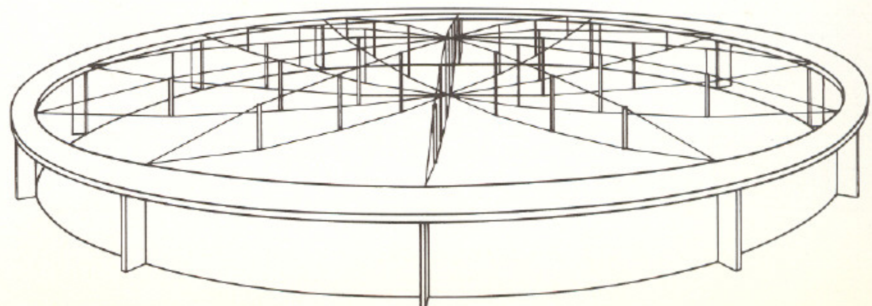
Sistemas con suspensión y estabilización en una dirección



Sistema plano paralelo.

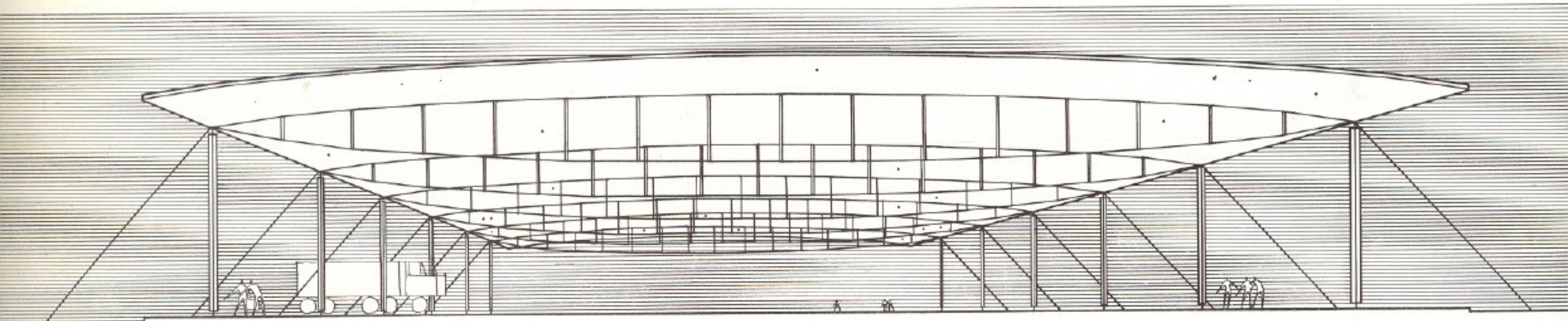


Sistema espacial paralelo.

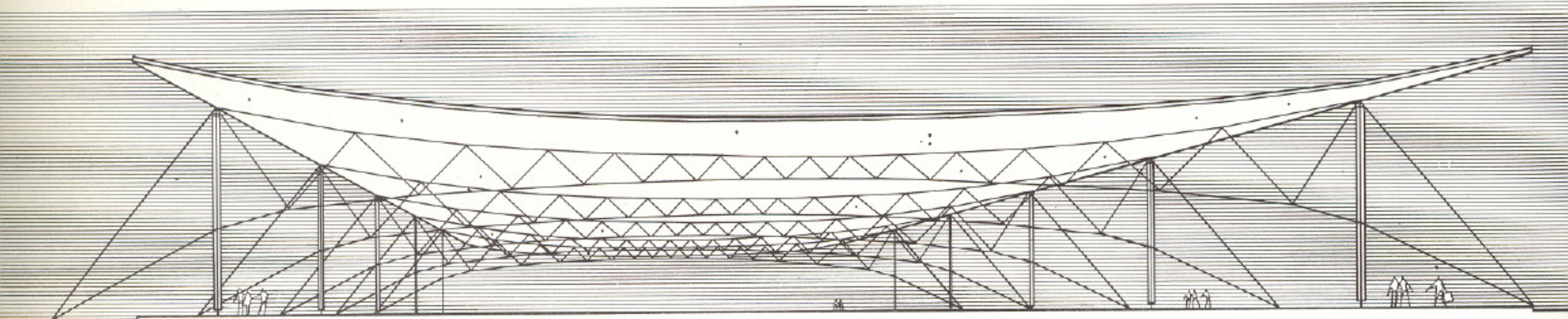


Sistema plano de revolución.

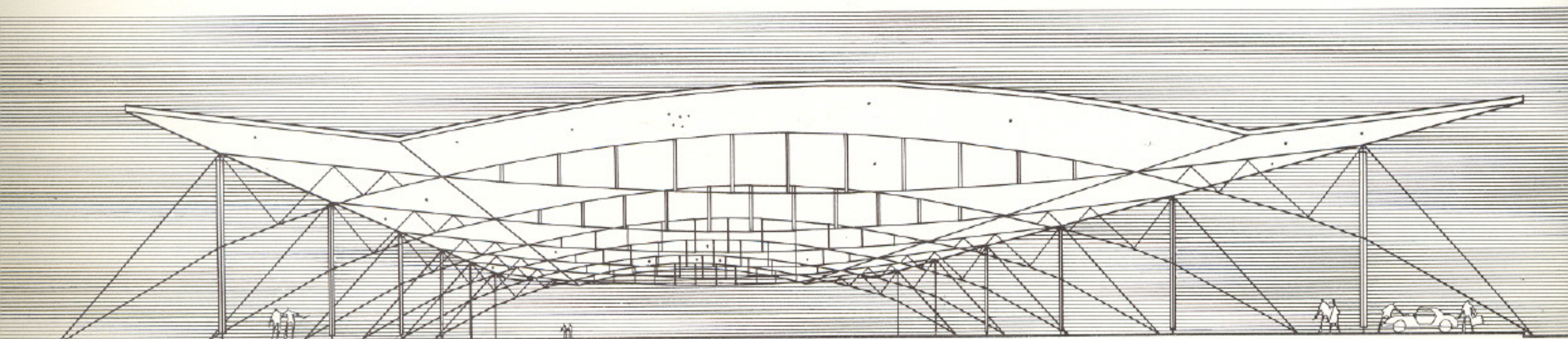
Sistemas planos paralelos estabilizados mediante cables de curvatura opuesta



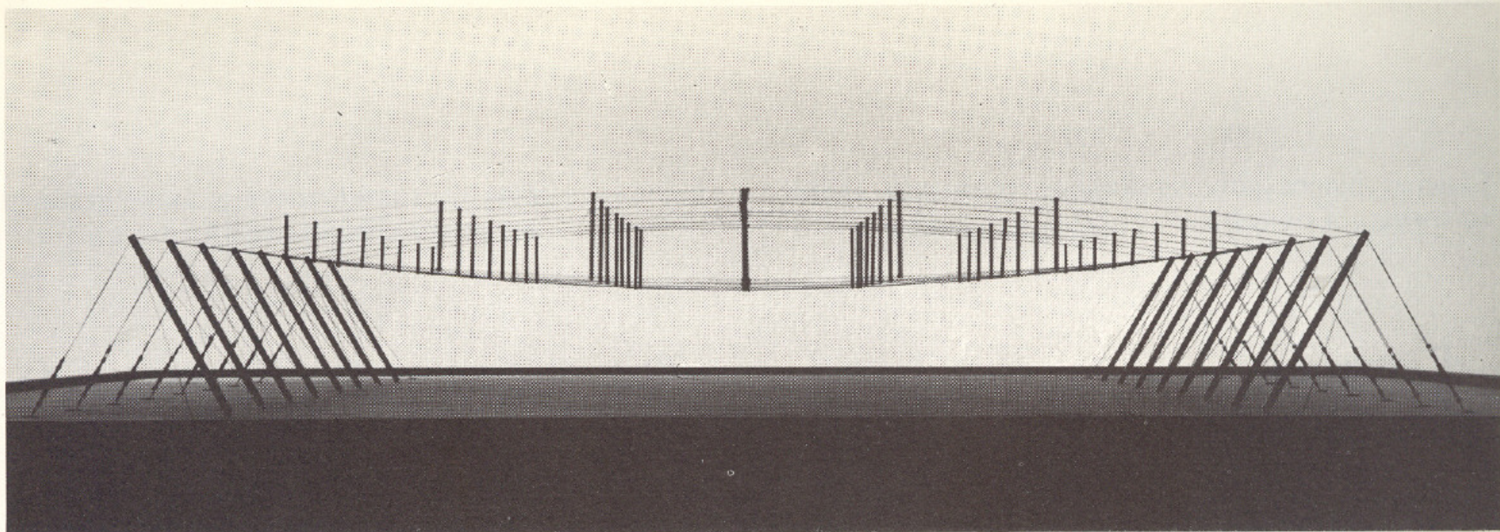
Cable de estabilización bajo el cable portante.

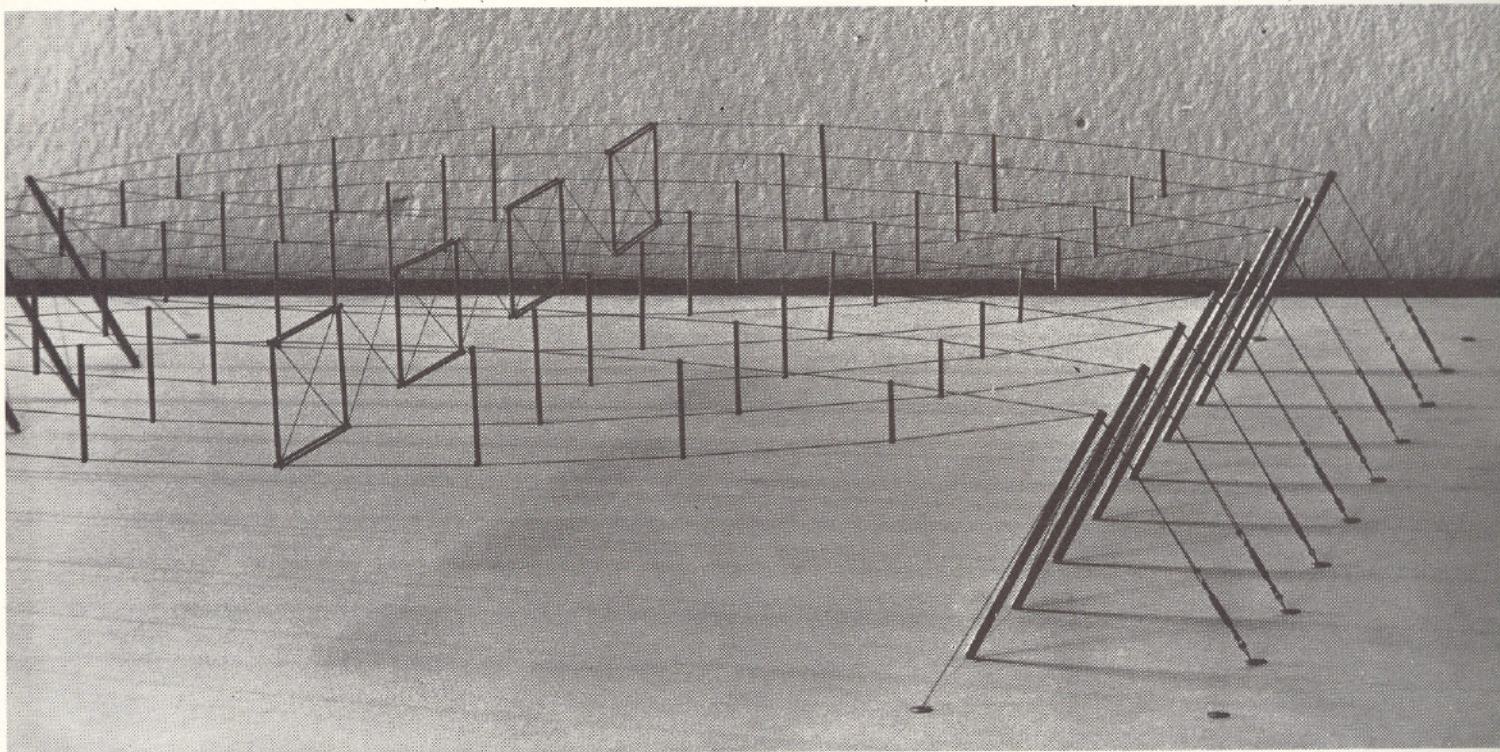


Cable de estabilización encima del cable portante.



Cable de estabilización, parte por encima y parte por debajo del cable portante.



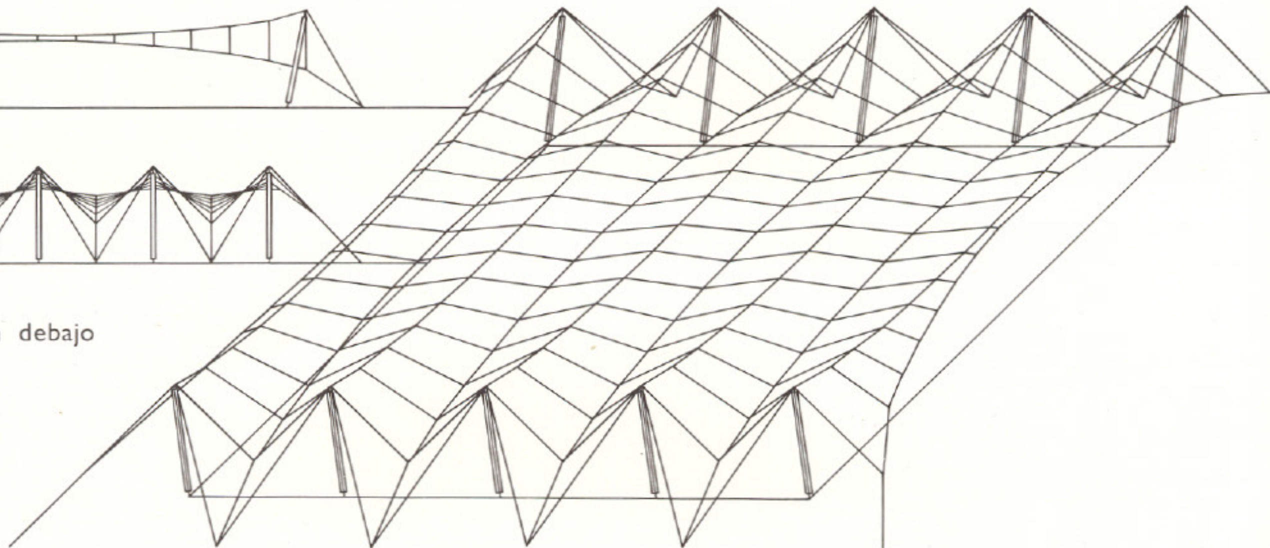


Sistema plano paralelo con cable de estabilización encima del cable portante.

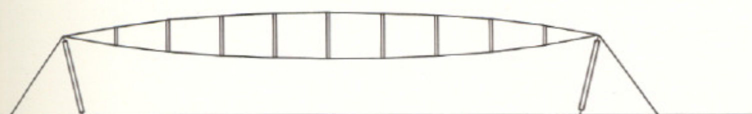
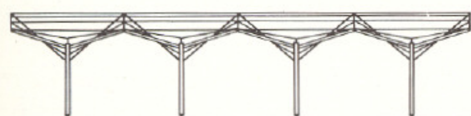
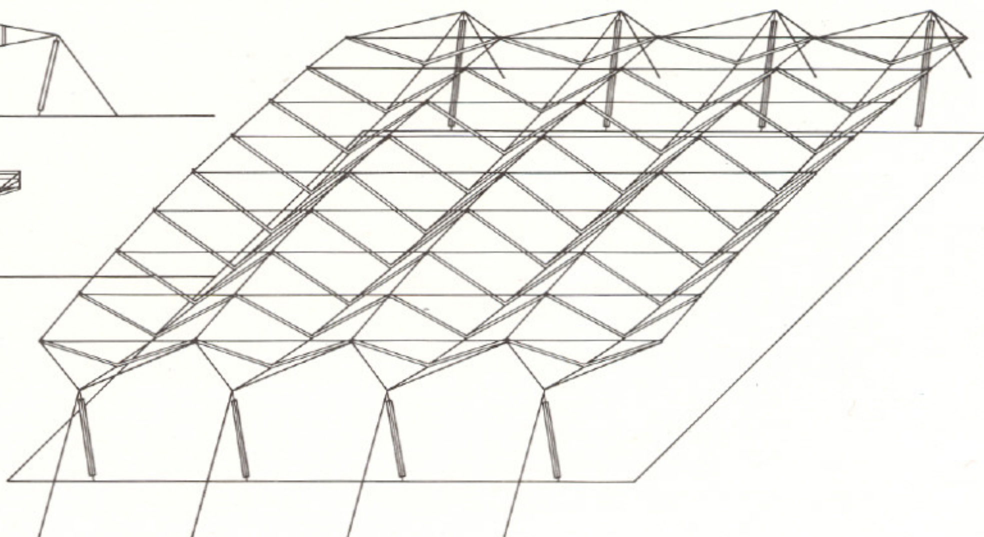
Sistemas planos con rigidización mediante cables de curvatura opuesta

Efectos sustentantes y estabilizadores en planos diferentes

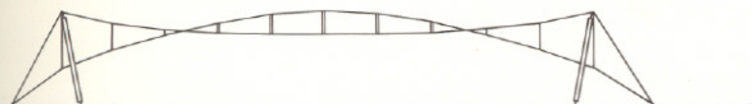
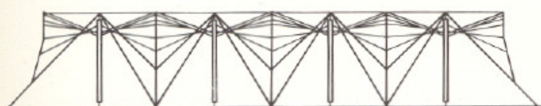
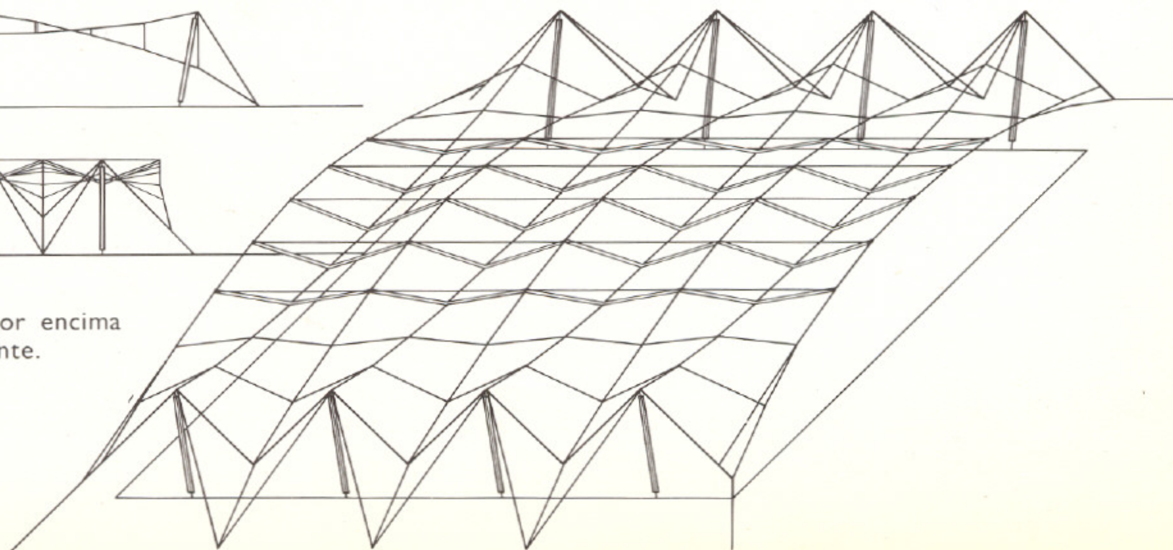




Cable de estabilización debajo del cable portante

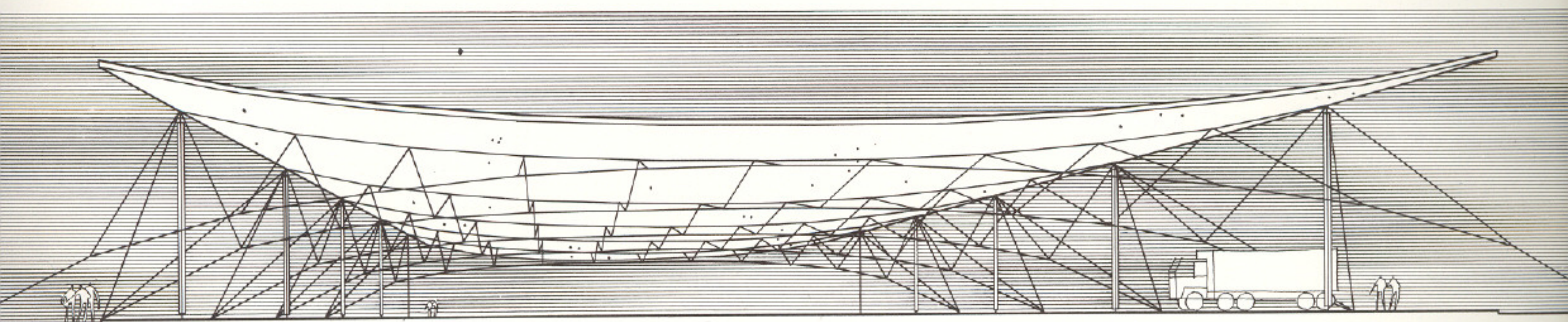
Cable de estabilización encima del cable portante.

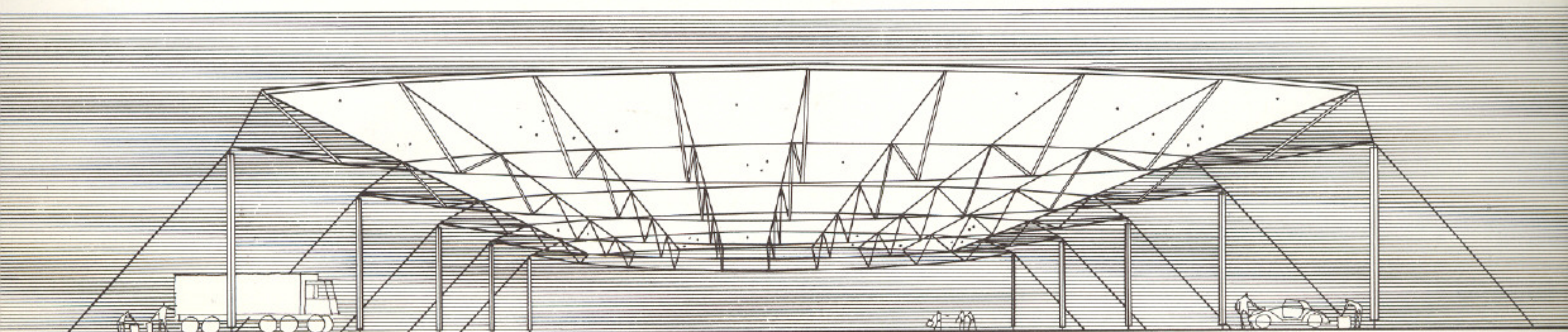
Cable de estabilización, parte por encima y parte por debajo del cable portante.

Sistemas espaciales paralelos con rigidización mediante cables de curvatura opuesta

Cable portante y cable de rigidización en diferentes planos

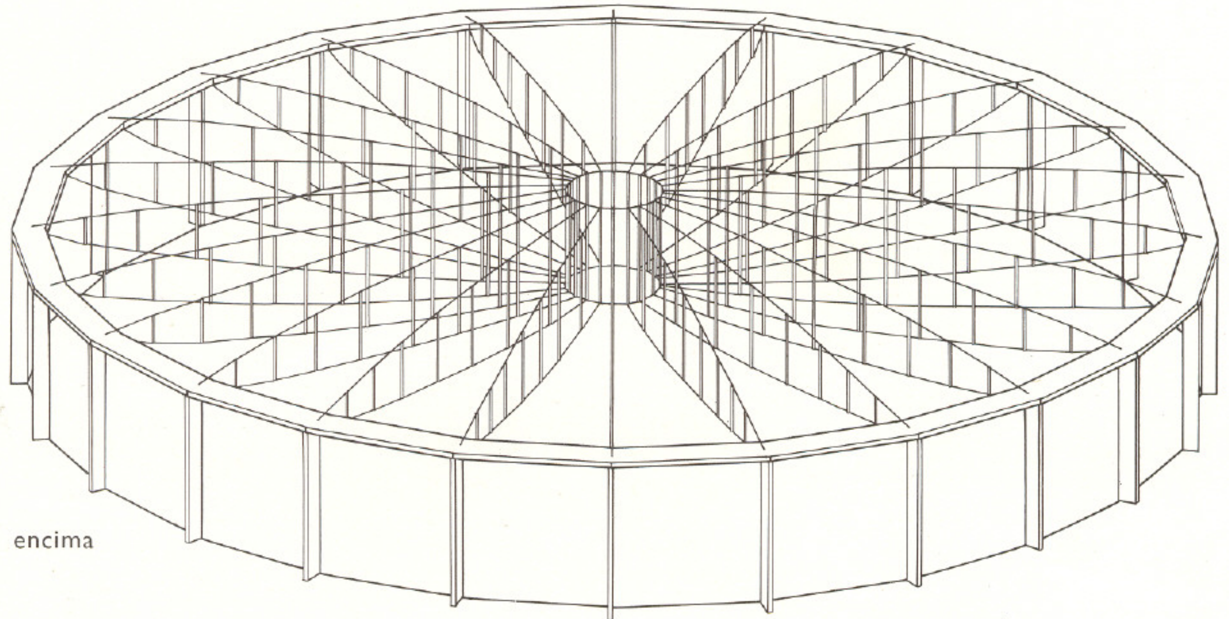


Cable de estabilización debajo del cable portante.

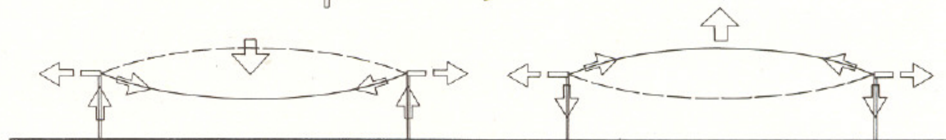


Cable de estabilización encima del cable portante.

Sistemas de revolución planos con rigidización mediante cables de curvatura opuesta

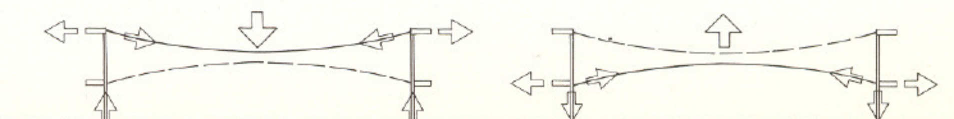


Cable de estabilización encima del cable portante.



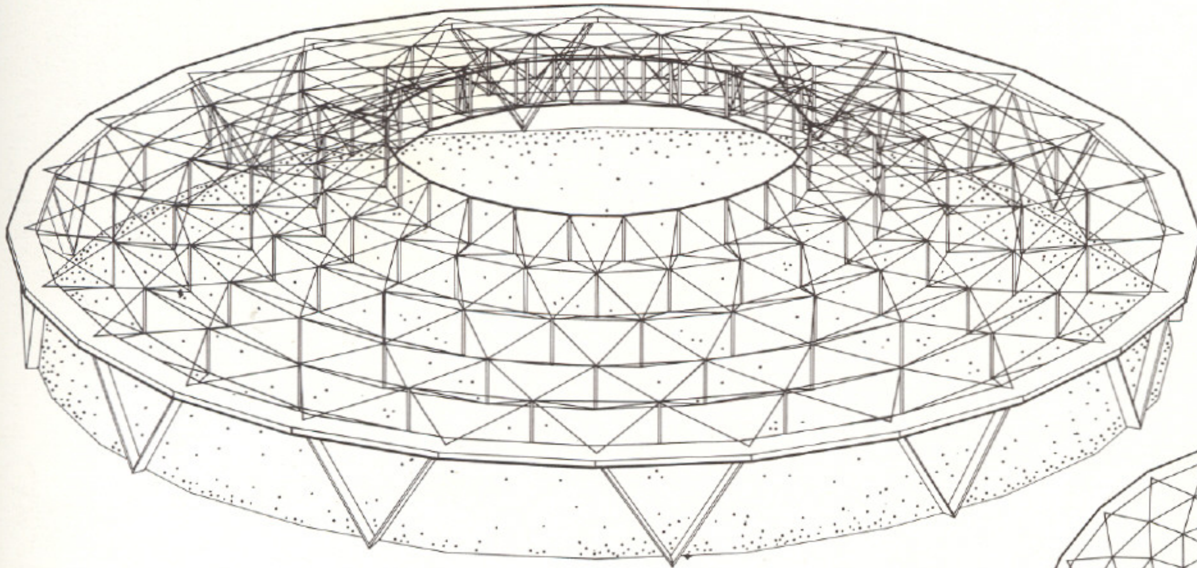
Mecanismo de suspensión y estabilización.

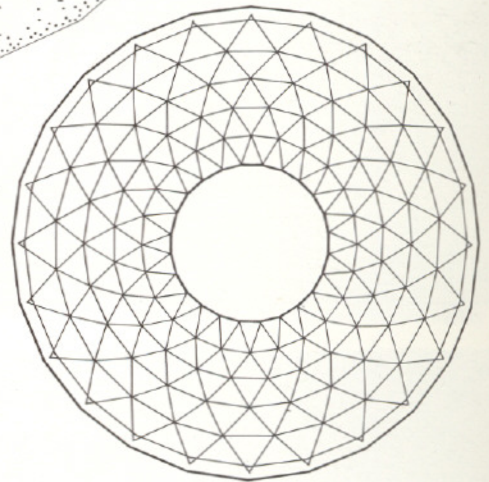
Cable de estabilización debajo del cable portante.



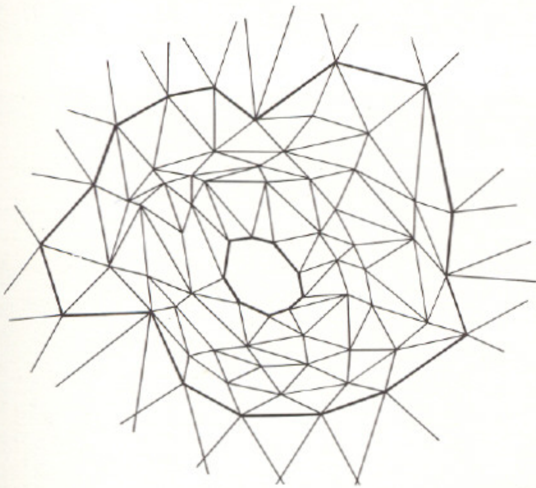
Mecanismo de suspensión y estabilización.

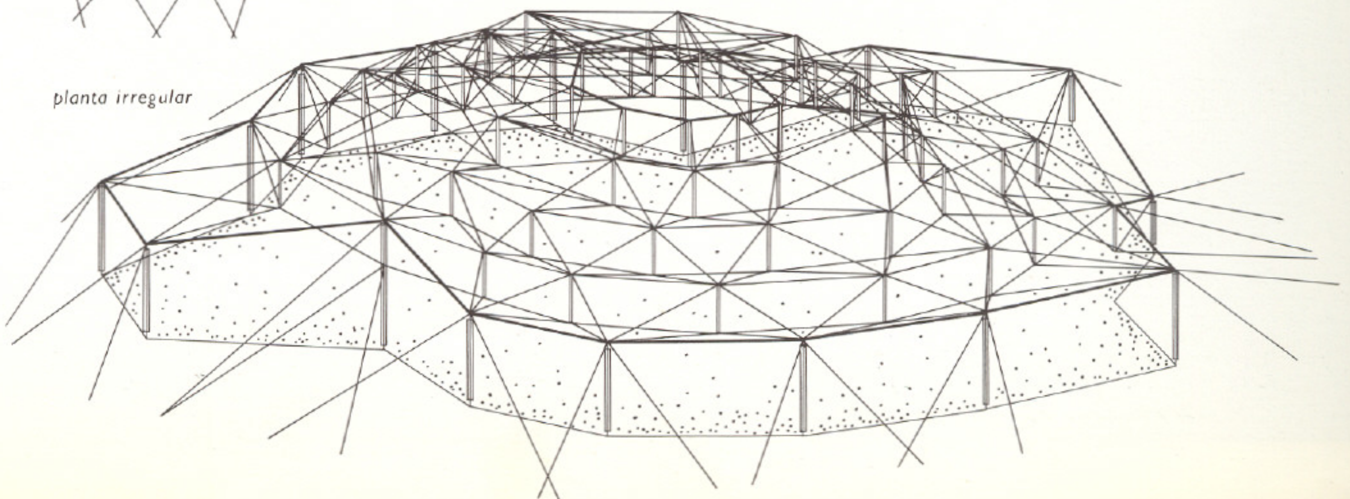
Sistema con entramado de tipo anular en dirección ascendente hacia el centro



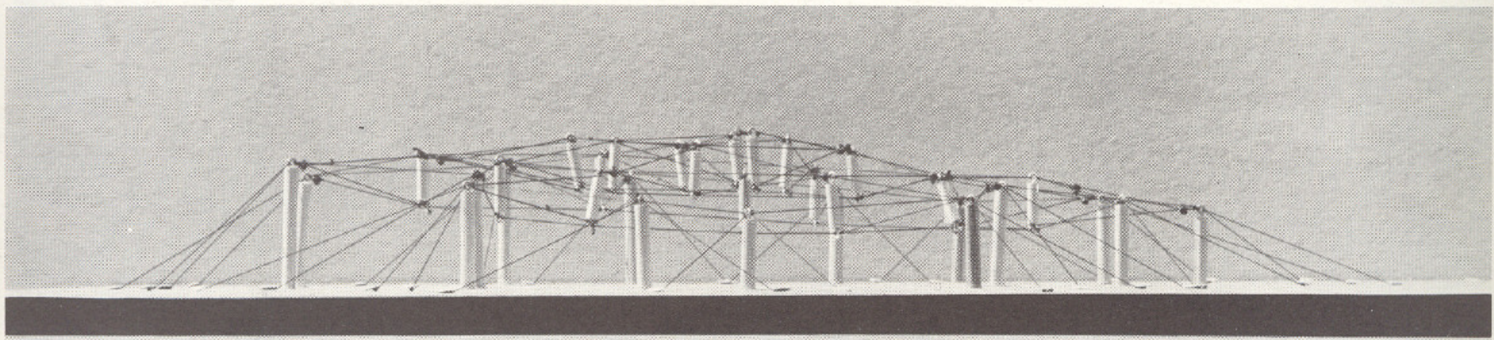


planta circular



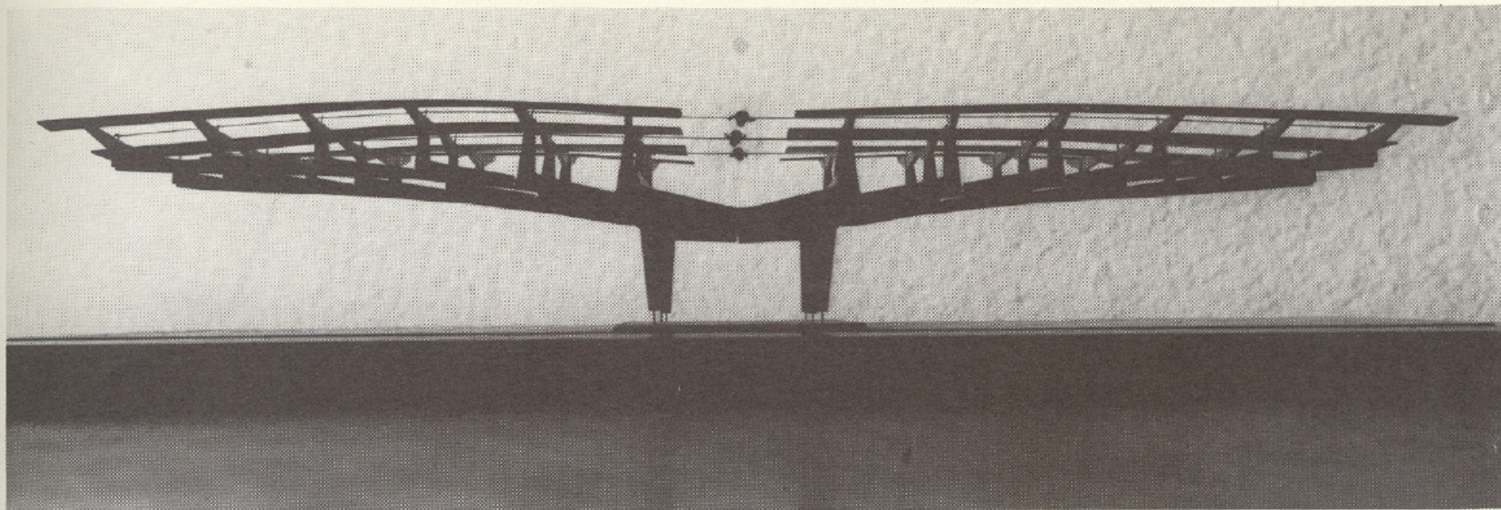


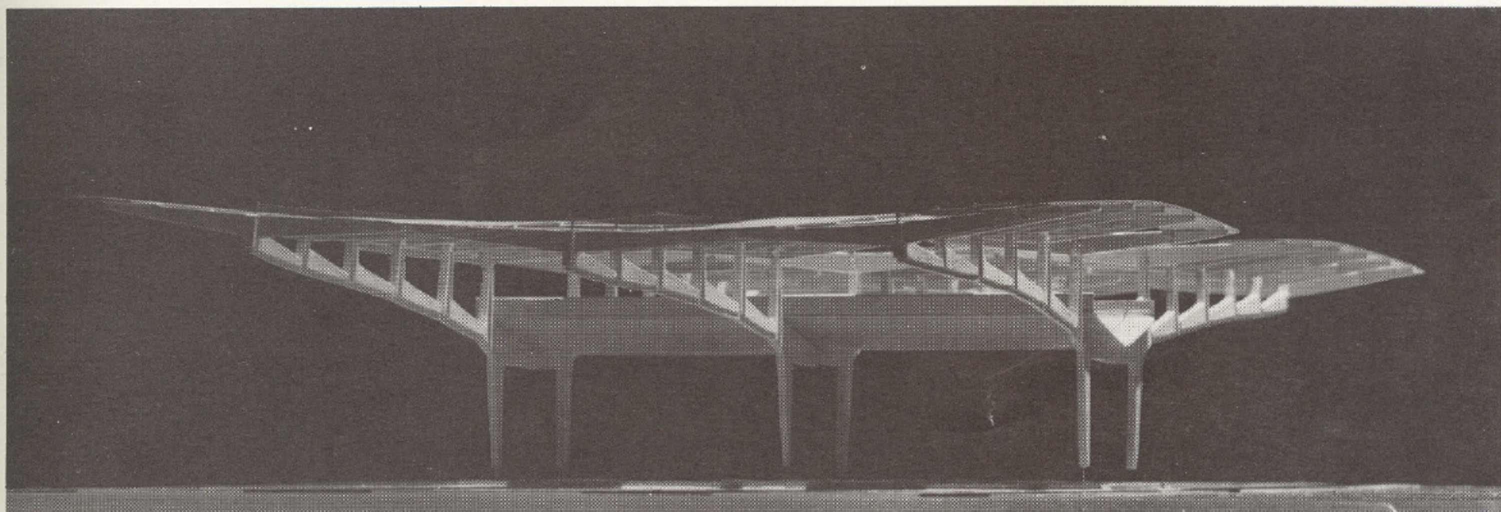
planta irregular

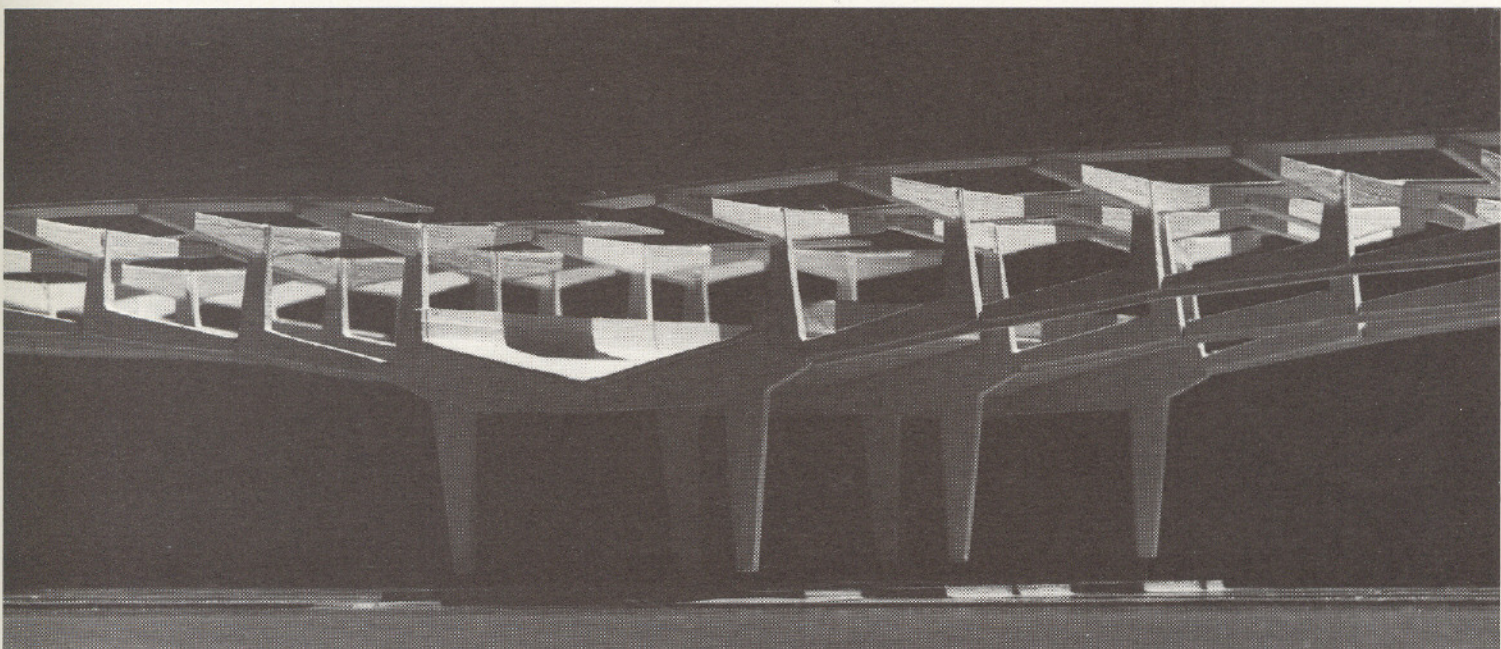


Arriba:
Sistema con entramado de tipo anular para planta irregular.

Izquierda:
Sistema con entramado de tipo anular para planta circular.



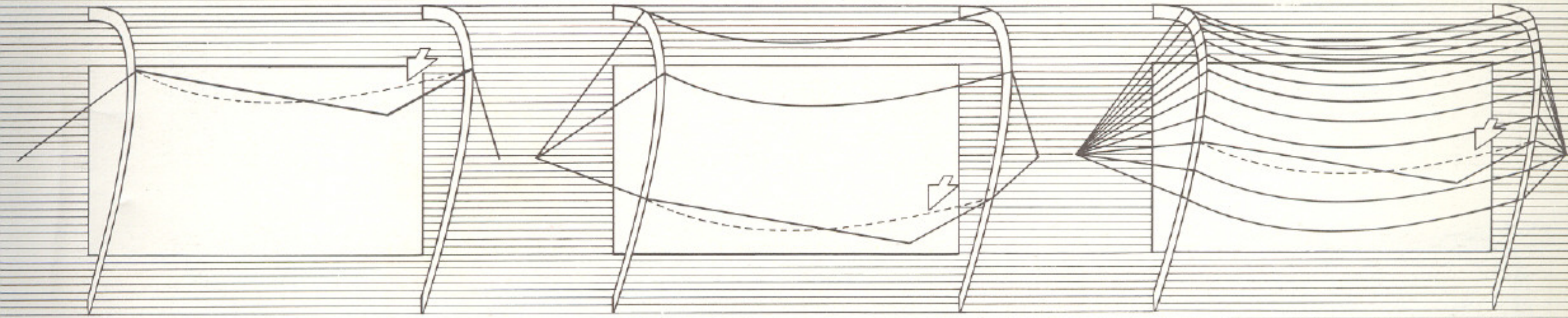




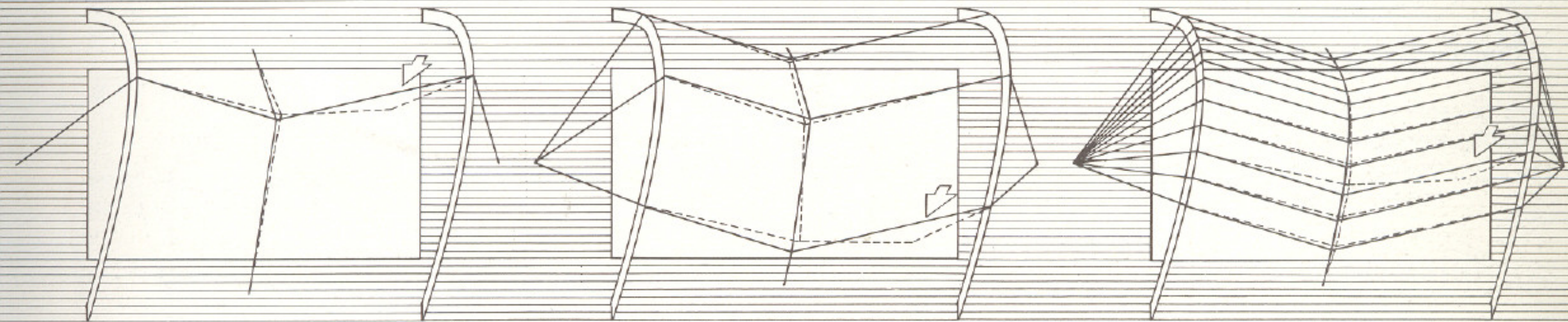
Sistema colgante con estructuras simétricas y
y estructuras de tres articulaciones.

Sistemas pretensados con cables de estabilización transversales

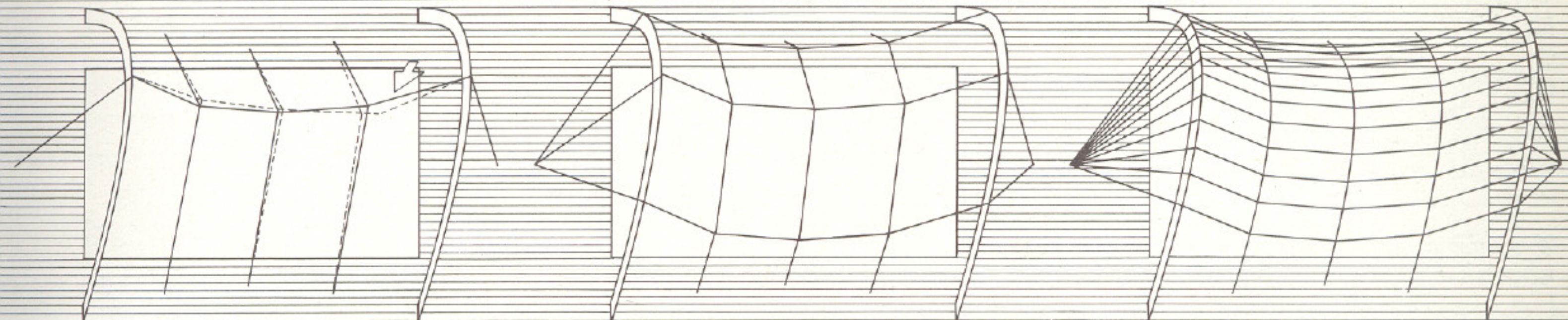
Desarrollo desde el simple cable colgante hasta la red de cables con curvatura opuesta.



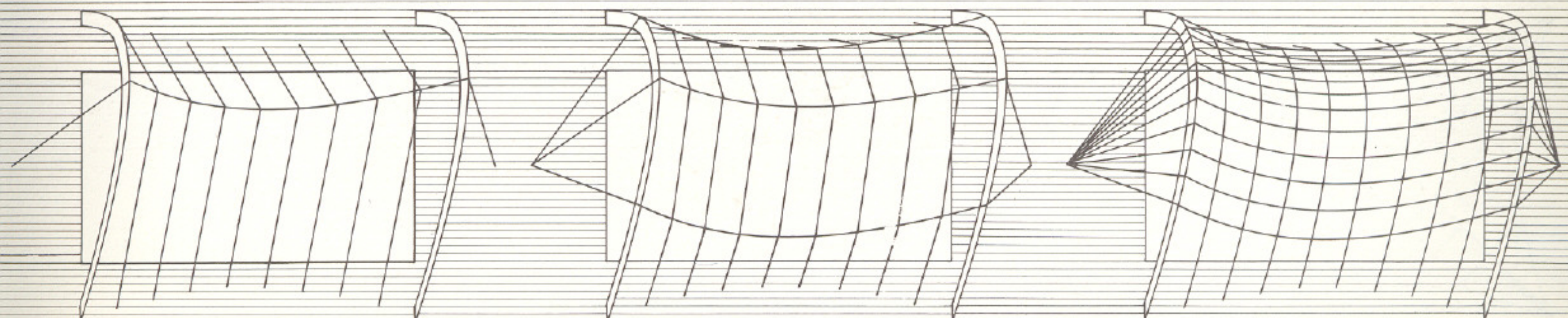
La carga aislada produce mayor deformación, que permanece localizada en el cable, bajo la carga.



El cable de estabilización transversal tensa el cable portante y amortigua la deformación.



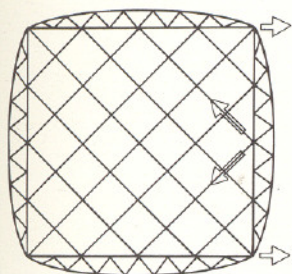
El incremento de cables estabilizadores aumenta la resistencia contra las cargas puntuales.



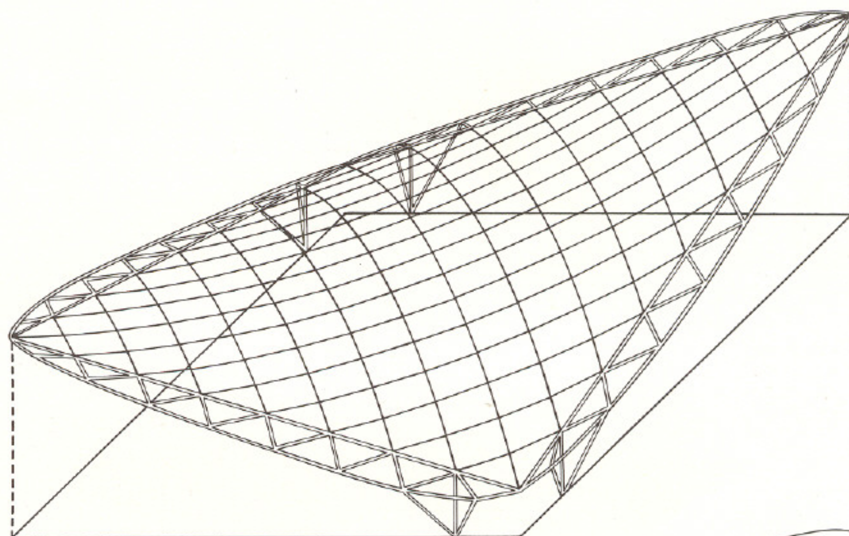
Todos los cables participan en el mecanismo para resistir la deformación debida a cargas aisladas.

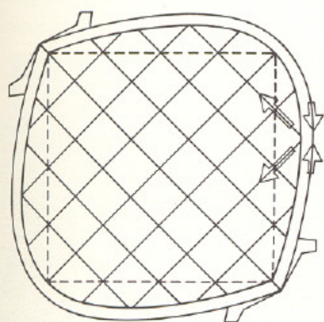
Sistemas de bordes para redes de cables con curvaturas opuestas

Derivación de la planta cuadrada.

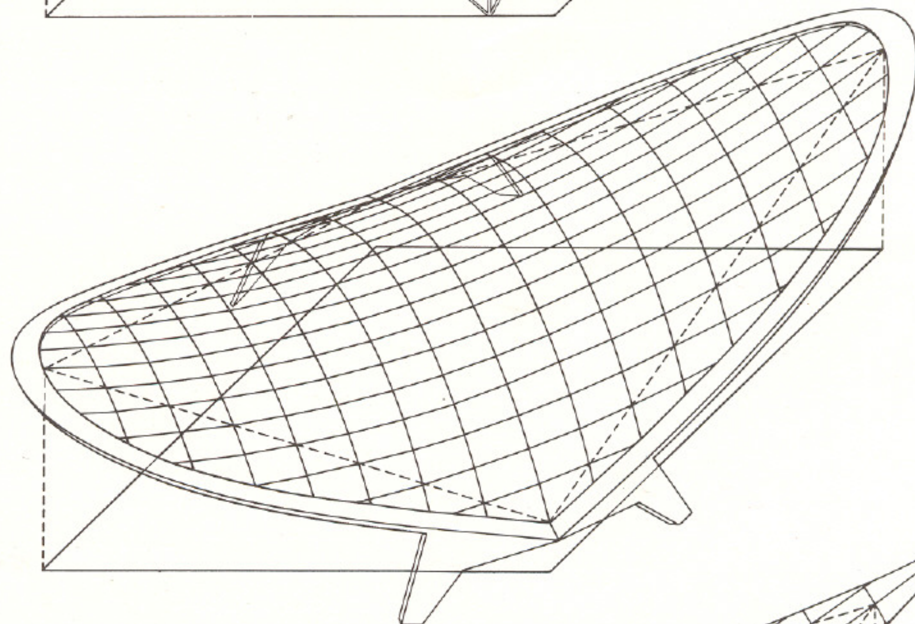


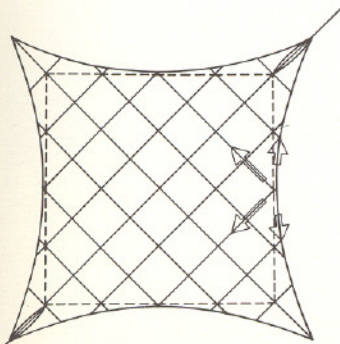
Cerchas perimetrales inclinadas sobre soportes.



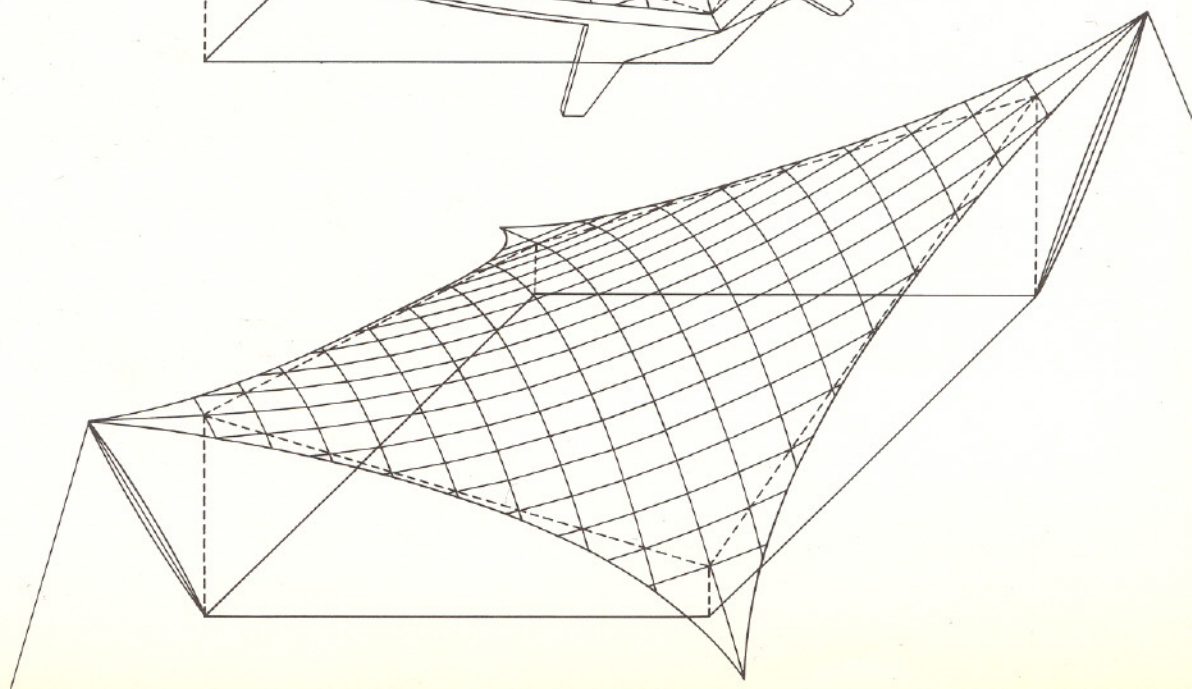


Arcos inclinados sobre bastidores.

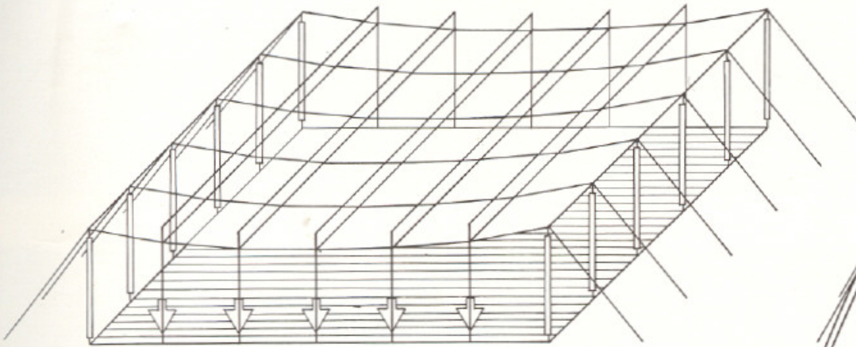




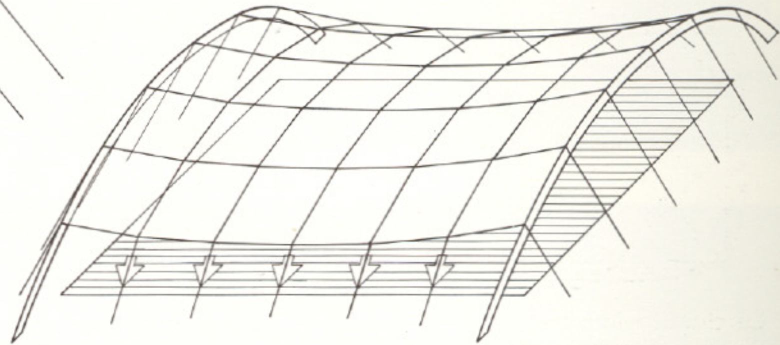
Cables de borde entre pilares venteados.



Sistemas pretensados con estabilización transversal



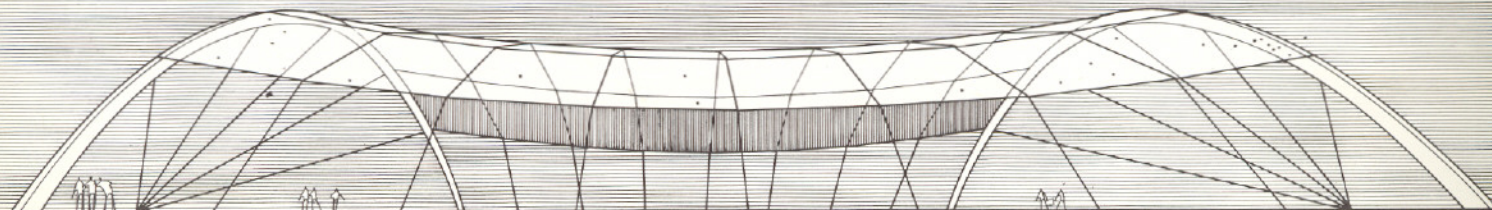
Estabilización mediante vigas transversales ancladas al suelo.



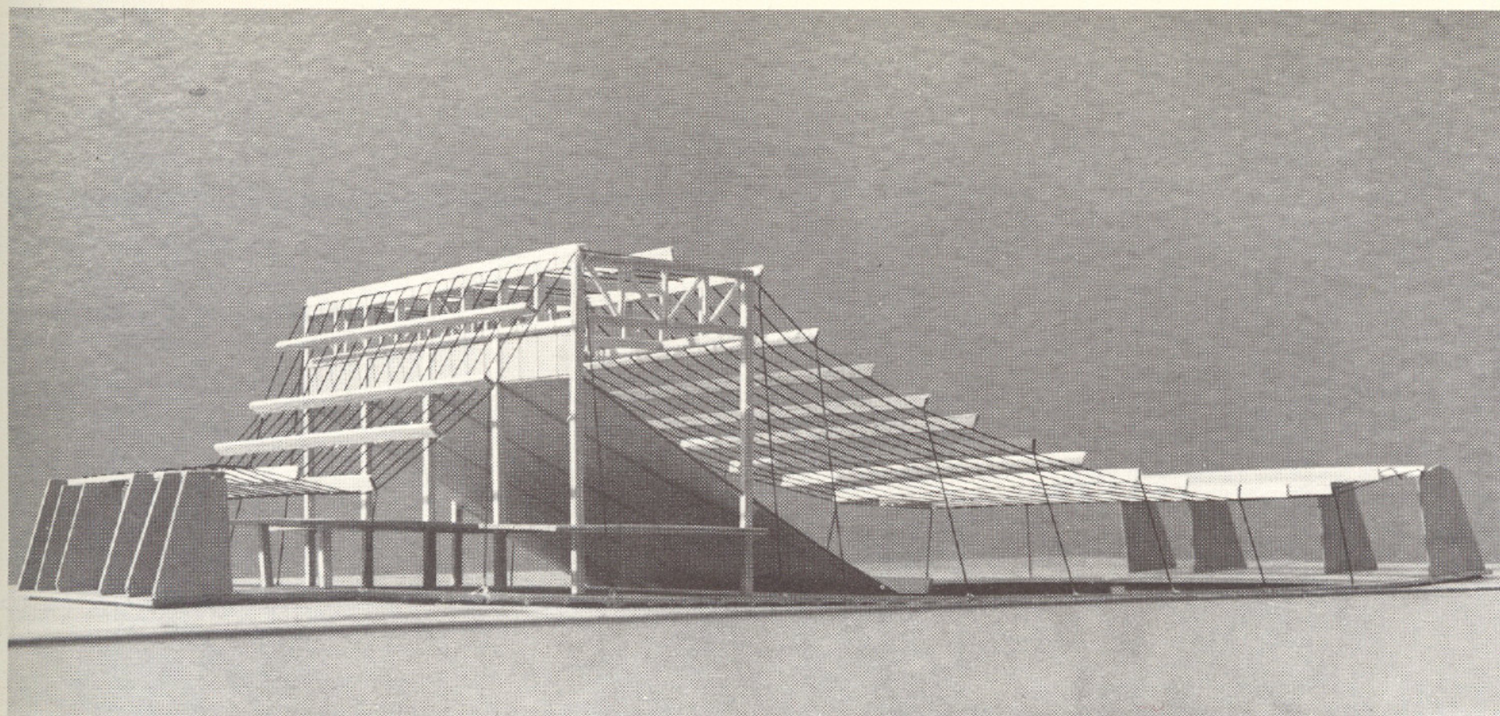
Estabilización mediante cables transversales anclados al suelo, con curvatura opuesta a la del cable portante.

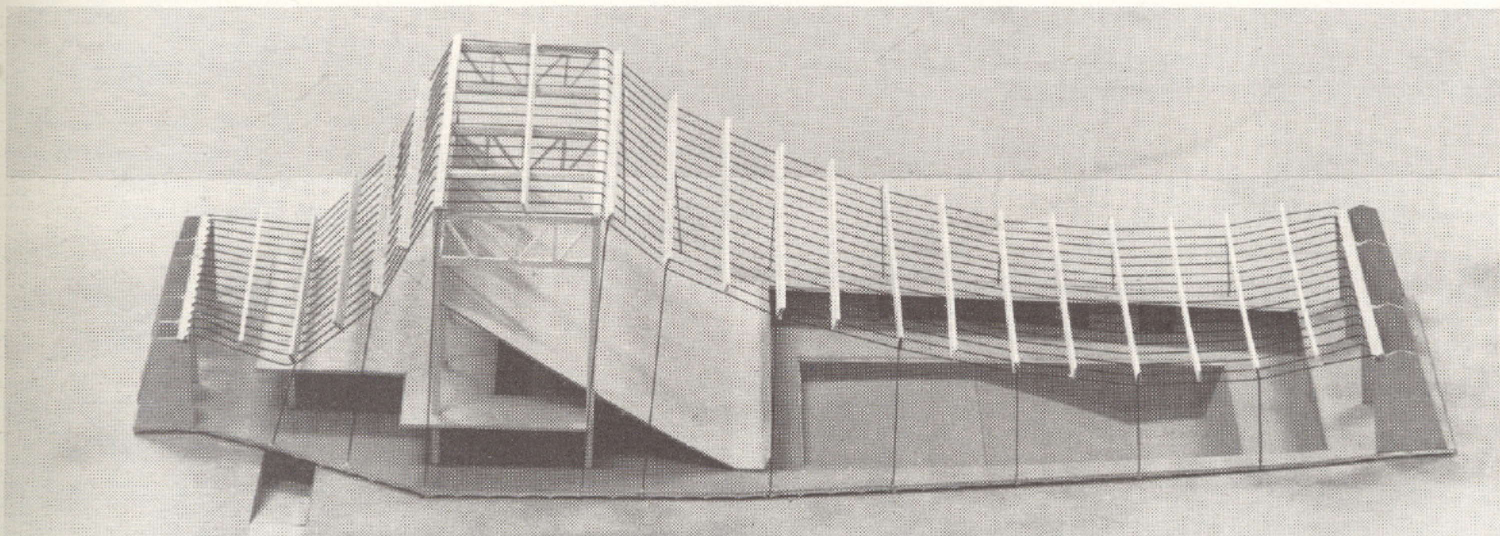


Sistema con vigas de estabilización transversales.

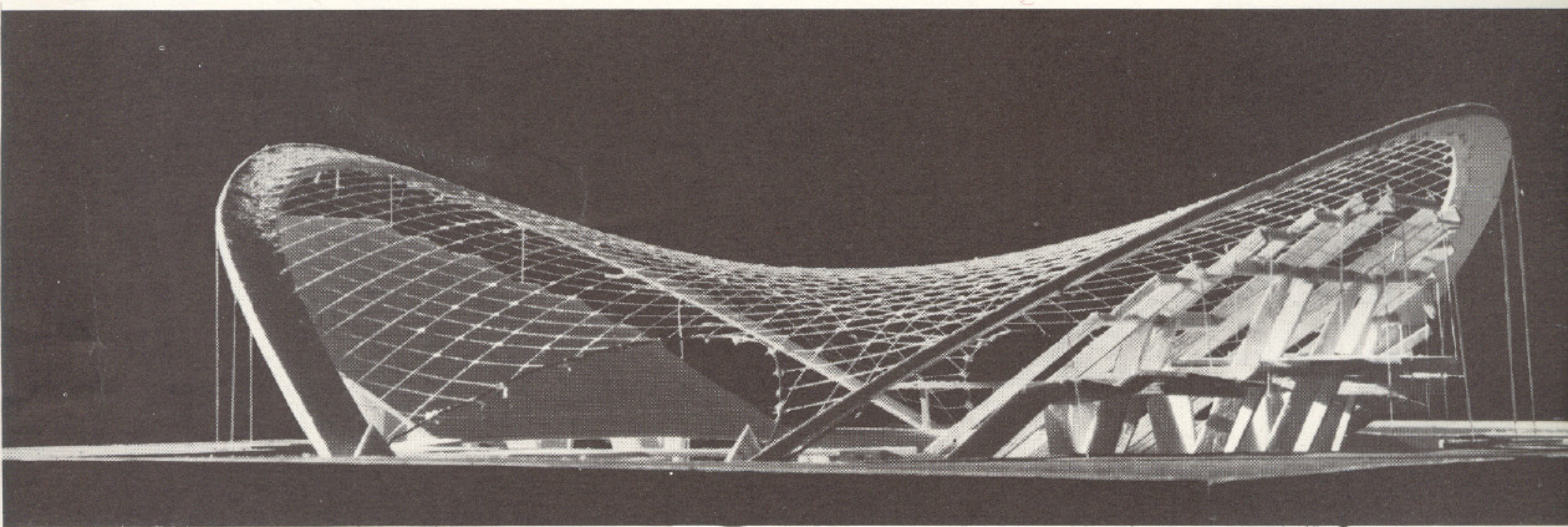


Sistema con cables de estabilización transversales.





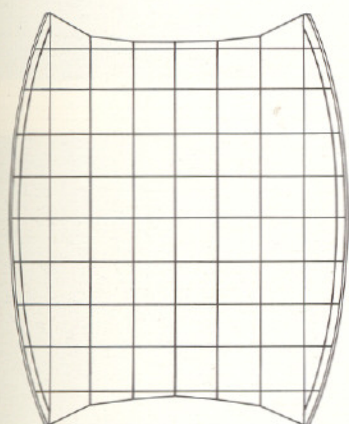
Sistema pretensado con vigas de estabilización transversales.

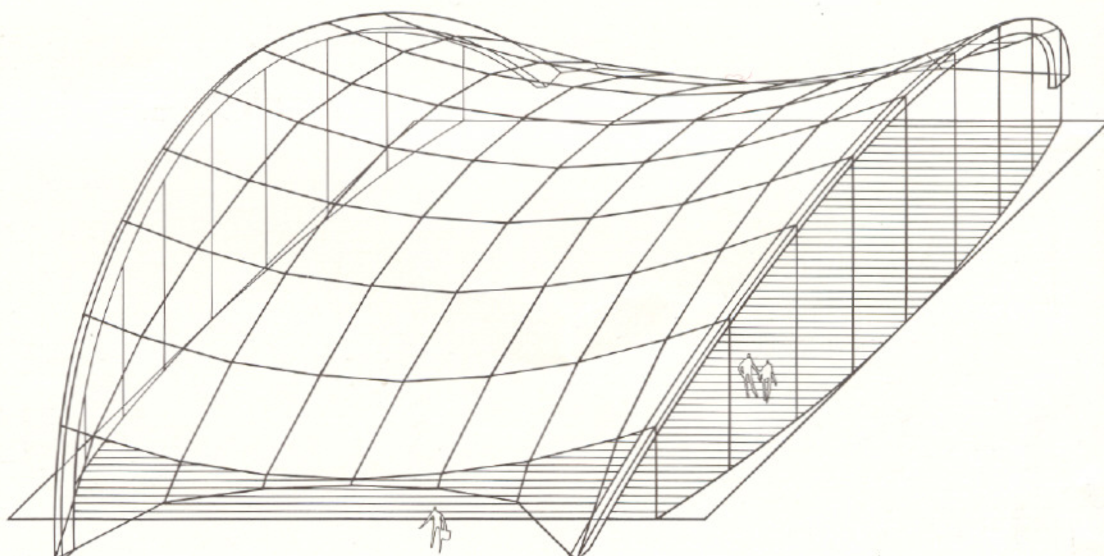


Sistema pretensado con cables de estabilización transversales.

Sistemas de arcos para redes de cables con curvaturas opuestas

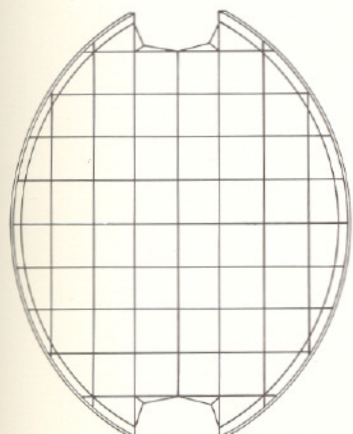


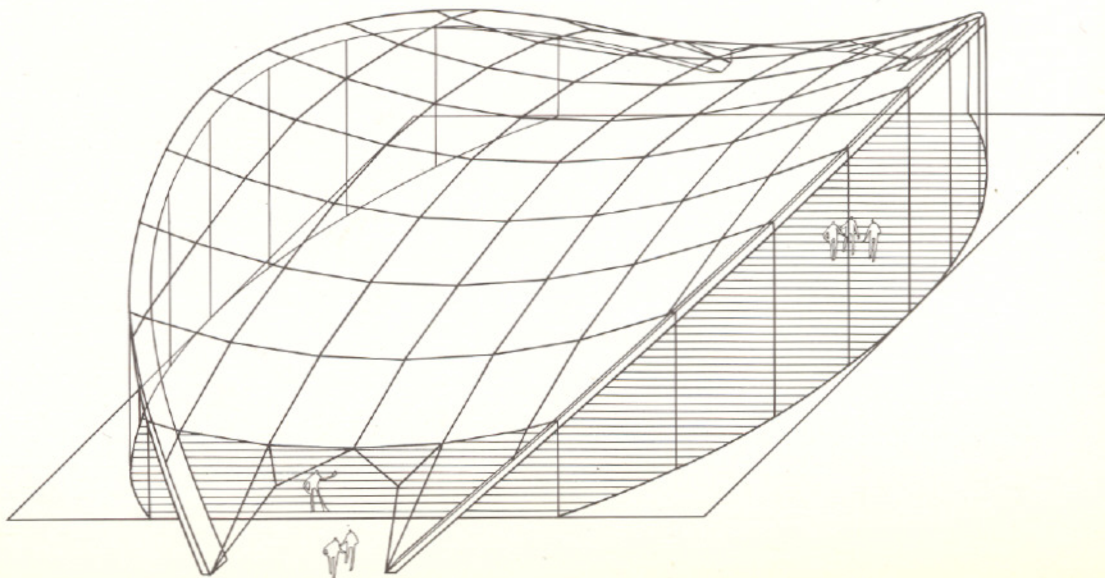




Arcos inclinados levemente hacia el exterior.



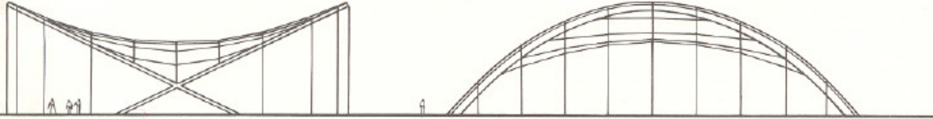


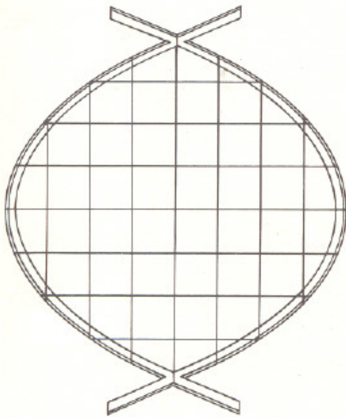


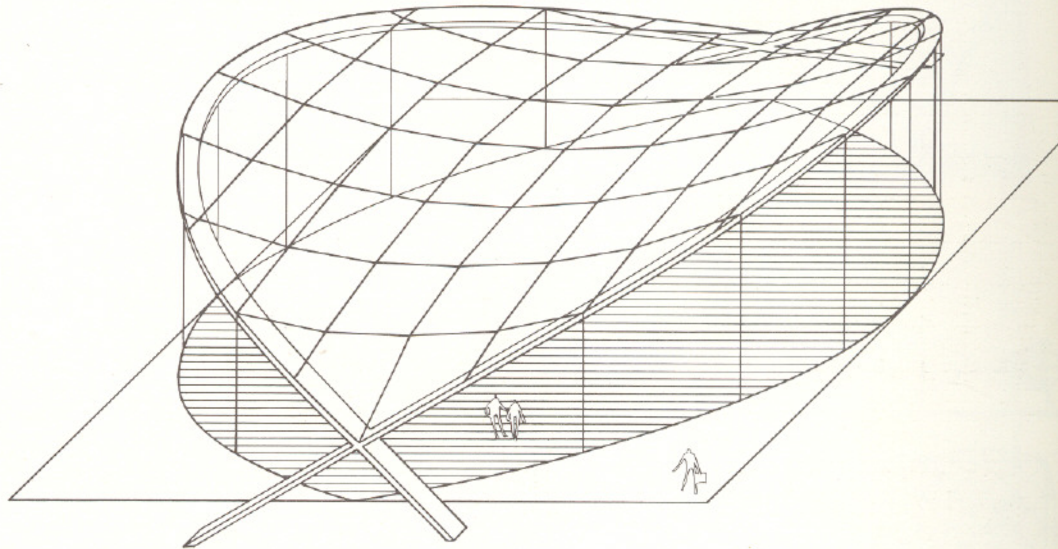
Apoyos de los arcos dispuestos hacia el interior.

Sistemas de arcos para redes de cables con curvaturas opuestas

Transición desde el arco hasta el anillo soporte.

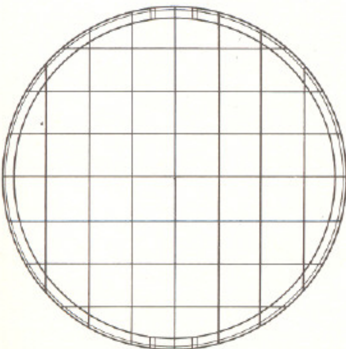


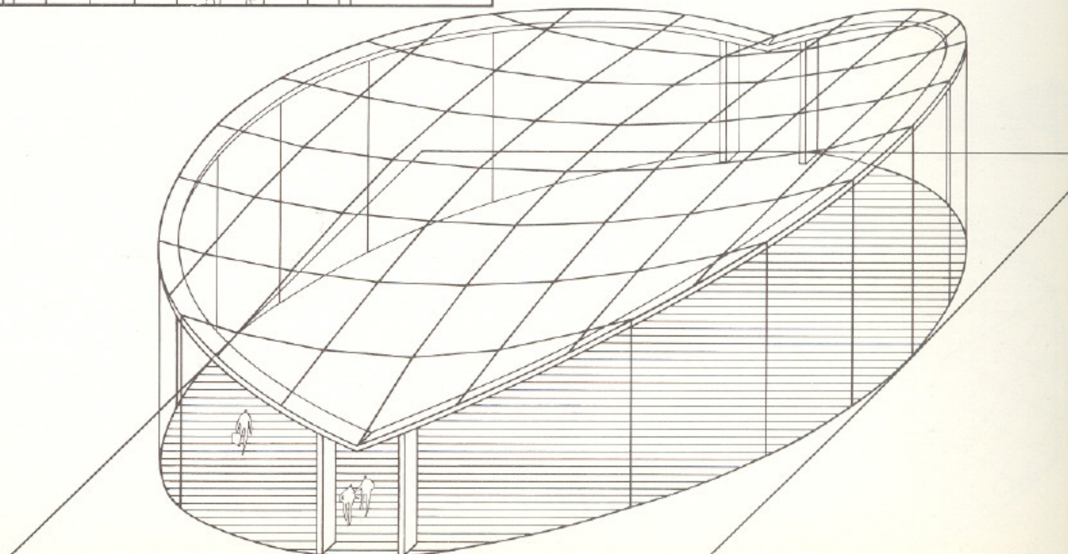




Arcos inclinados cruzándose entre sí por encima de sus apoyos.

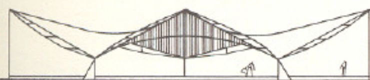


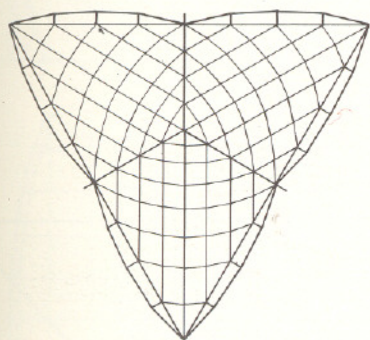




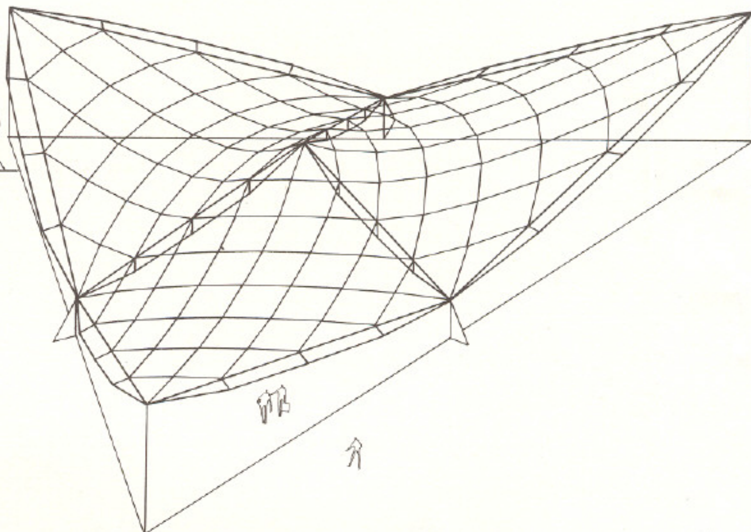
Anillo soporte inclinado, sobre soportes extremos.

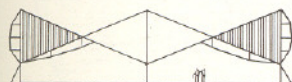
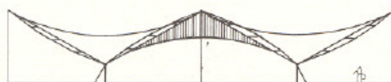
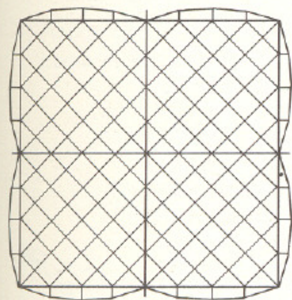
Combinación de redes de cables con curvaturas opuestas, con bordes rectos



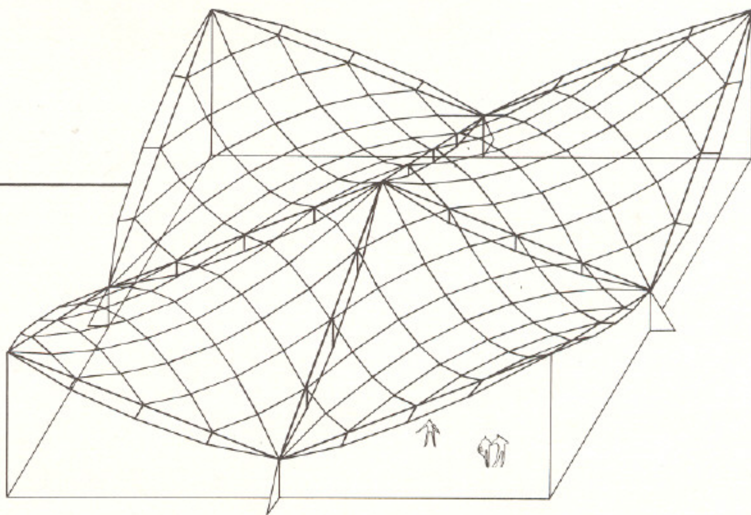


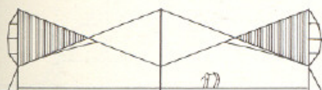
Tres unidades sobre planta triangular.

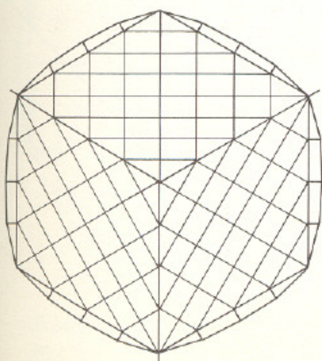


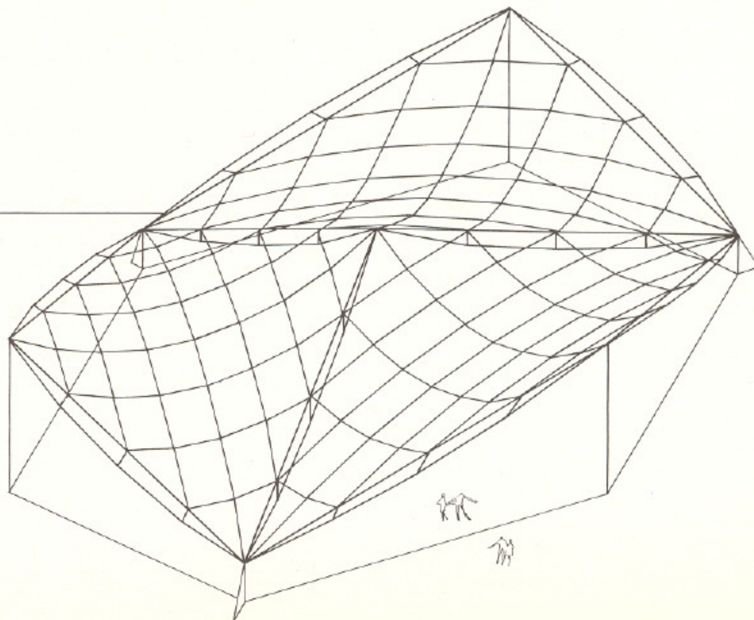
Cuatro unidades sobre planta cuadrada.





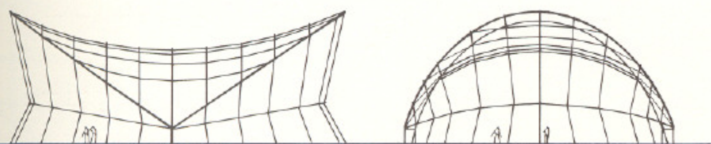


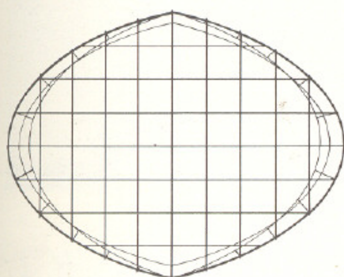
Tres unidades sobre planta hexagonal.



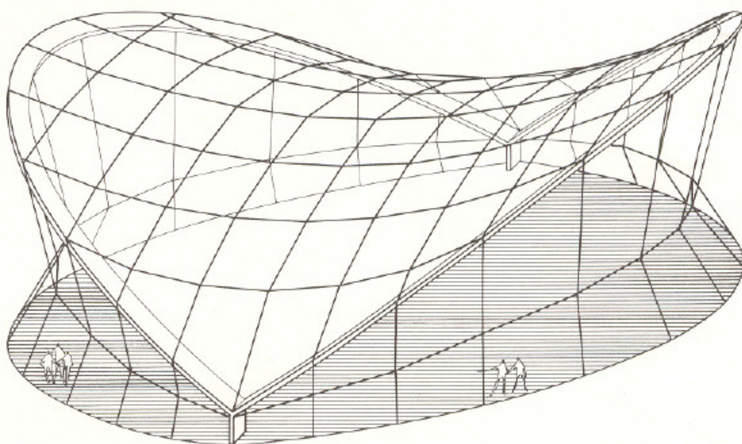
Sistema pretensado compuesto por redes de cables de bordes rectos, con curvaturas opuestas.

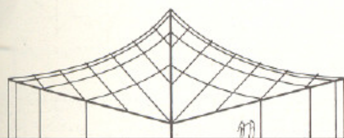
Combinación de redes de cables con curvaturas opuestas, con arcos de borde

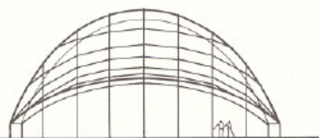


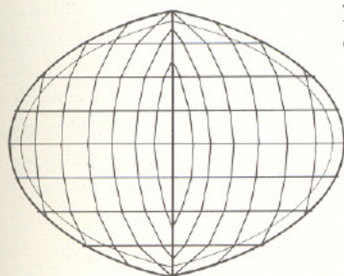


2 arcos de borde con apoyos comunes.

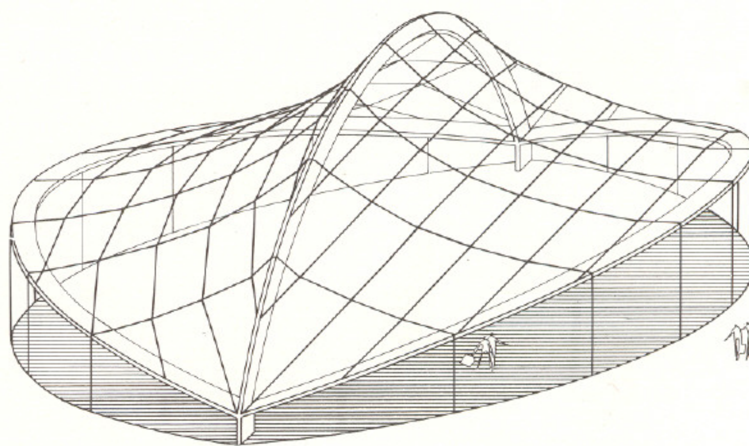


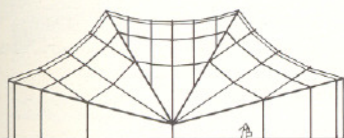


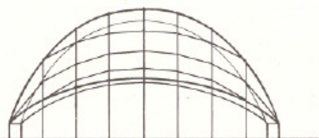


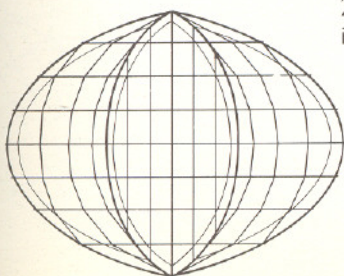


2 arcos de borde con un arco central.

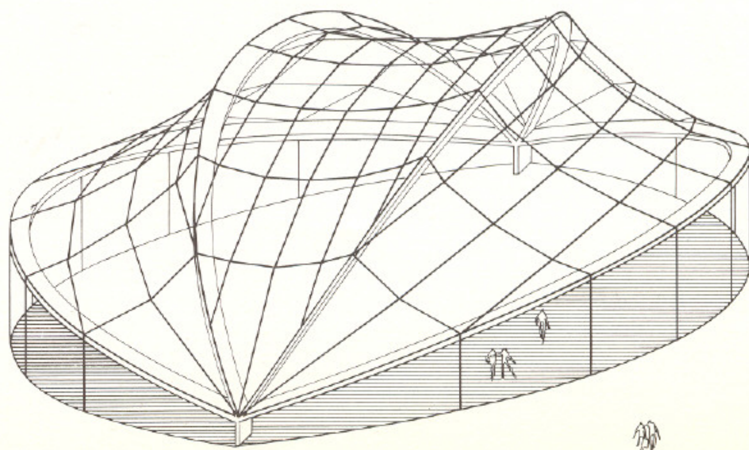






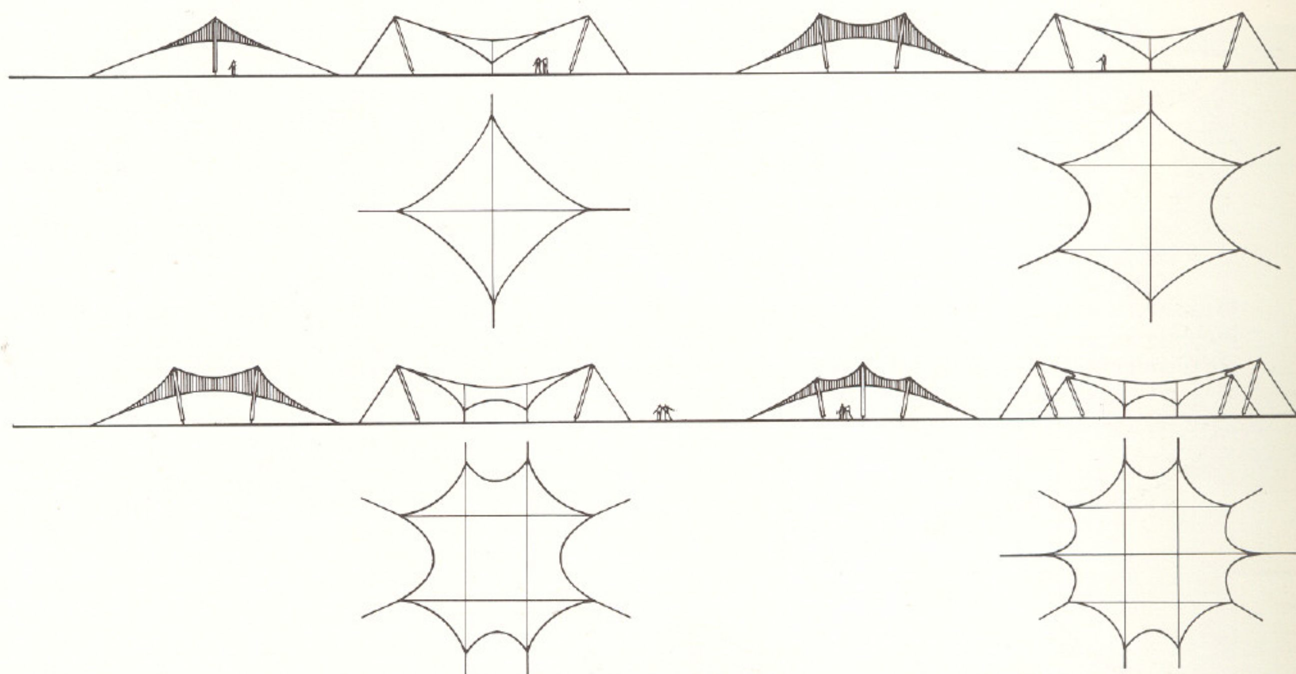


2 arcos de borde con 2 arcos intermedios.



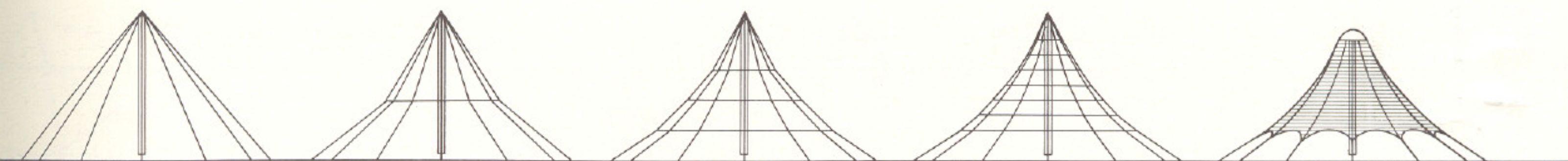
Sistemas en forma de tienda, con apoyo exterior mediante elementos en compresión

Sistemas con superficies en forma de silla de montar.



Sistemas en forma de tienda con apoyo interior mediante elementos de compresión

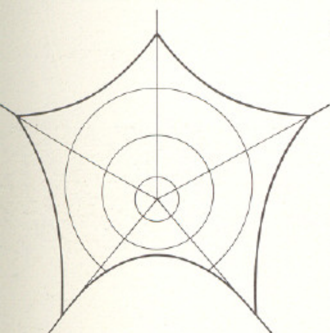
Sistemas de superficies peraltadas.



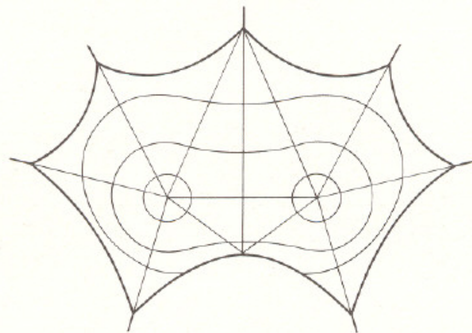
Derivación de la superficie peraltada a partir de la red de cables de forma cónica.

Mediante zunchado con cables anulares horizontales, se incrementa la resistencia contra las cargas asimétricas. De la condensación de los cables paralelos y meridianos resulta la membrana de la tienda. A causa de la concentración de las fuerzas en el vértice, ha de ensancharse la superficie de la cima. Se origina así la forma de giba.

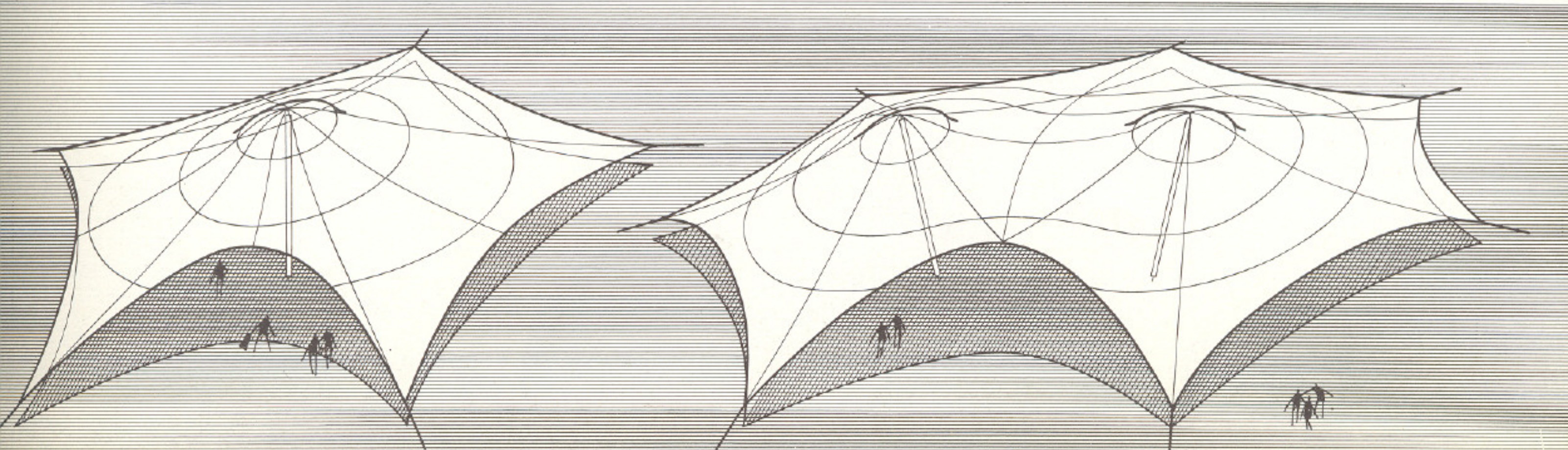




Sistema con un punto alto.



Sistema con dos puntos altos.



Sistemas en forma de tienda con apoyo interior mediante elementos en compresión

Puntos altos con diferentes alturas.

Punto de anclaje adicional en el centro.

Sistemas en forma de tienda con arco interior para formar el punto alto



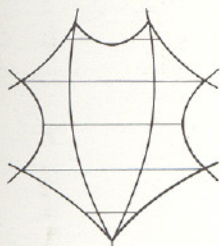
Un punto de anclaje a cada lado.

Dos puntos de anclaje a cada lado.

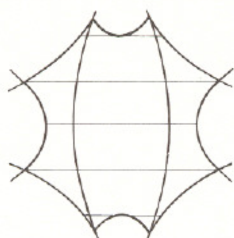
Tres puntos de anclaje a cada lado.

Sistemas en forma de tienda con dos arcos centrales para formar los puntos altos

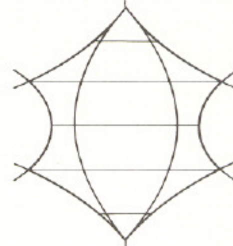




Un apoyo común.



Apoyos separados



Apoyos comunes.

Sistema en forma de tienda con soportes y puntos de anclaje alternados.

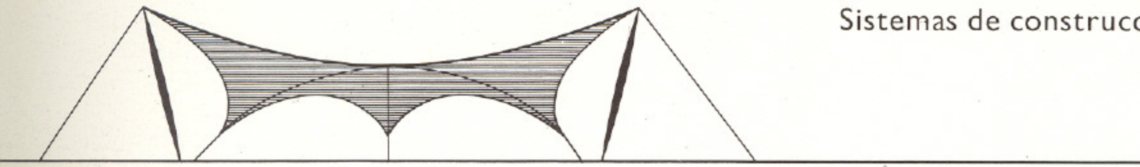
Sistemas en forma de tienda con soportes y puntos de anclaje alternados

Sistemas con superficies onduladas.

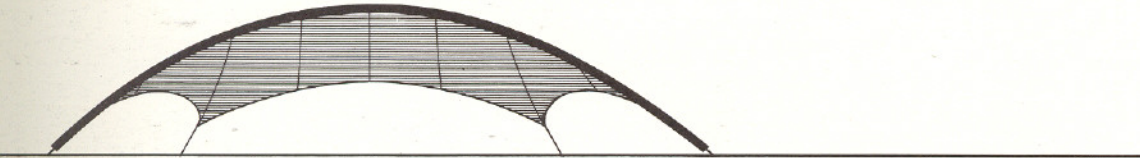
Sistema con ordenación paralela de puntos fijos.

Sistema con ordenación radial de puntos fijos.

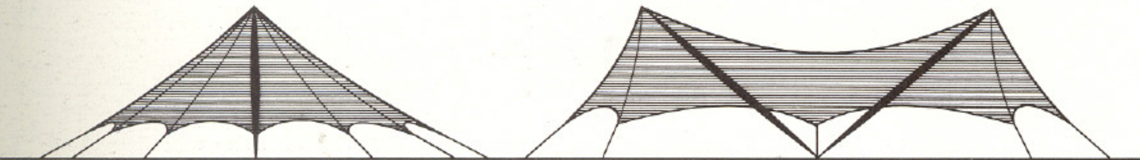
Sistemas de construcción directos para puntos altos



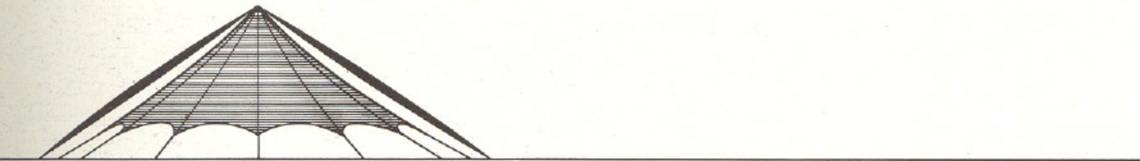
Soportes exteriores para puntos altos dispuestos periféricamente.



Arco interior para puntos altos dispuestos radialmente.

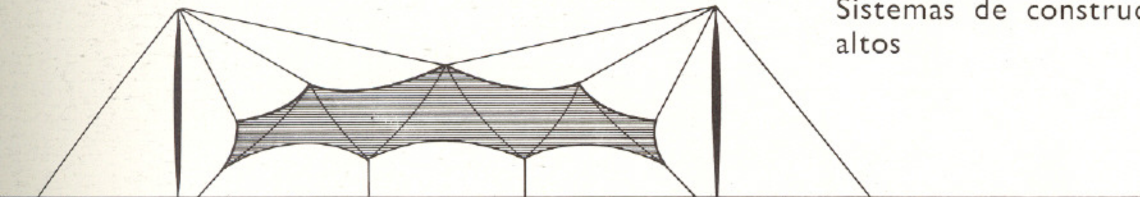


Soportes interiores para puntos altos dispuestos centralmente.

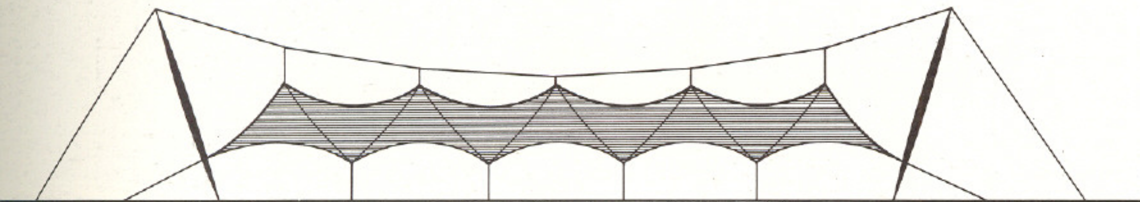


Soportes exteriores para puntos altos dispuestos centralmente.

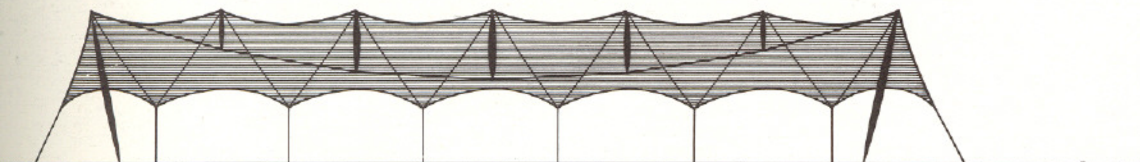
Sistemas de construcción indirectos para puntos altos



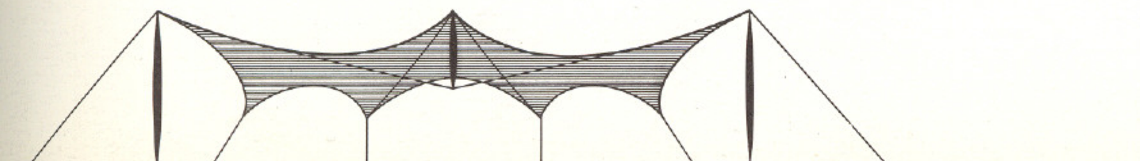
Soportes exteriores con cables de retención para puntos altos dispuestos centralmente.



Soportes exteriores con cable colgante para la suspensión de puntos altos dispuestos centralmente.



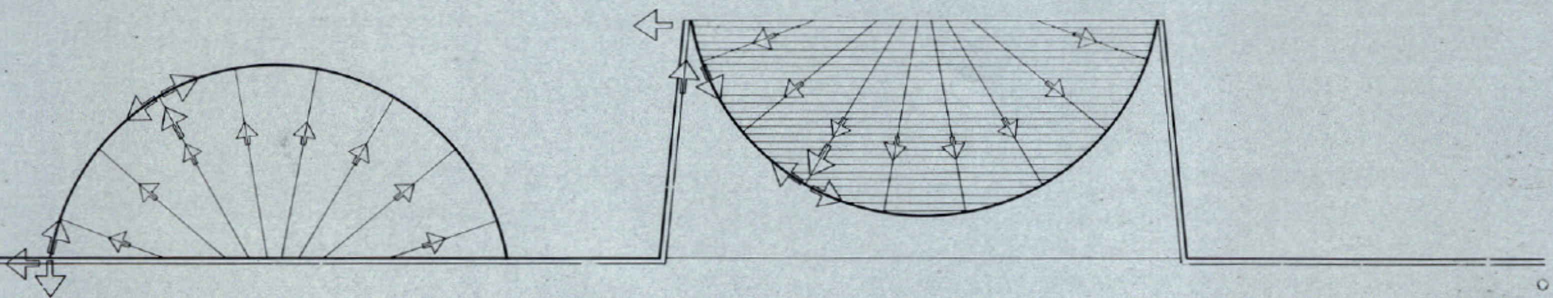
Soportes interiores con cable colgante para sustentación de puntos altos dispuestos centralmente.



Soportes exteriores para puntos altos periféricos con cable de retención para puntos altos adicionales dispuestos centralmente.

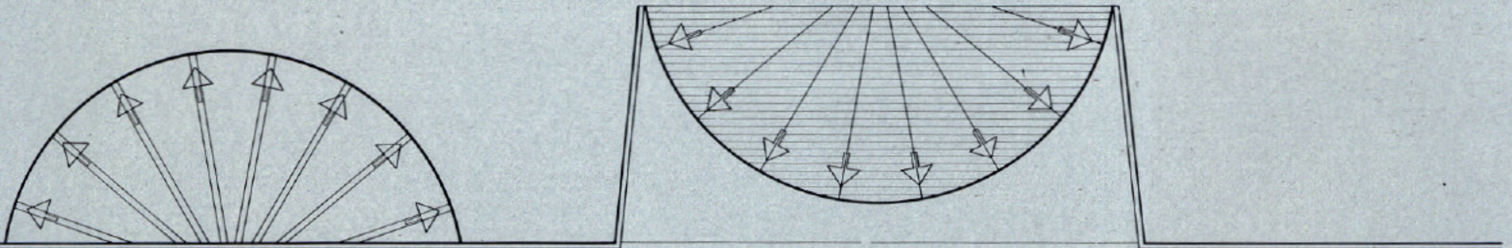
Mecanismos de estructuras neumáticas: comparación con los depósitos membrana

Sistemas estructurales soportados por aire.

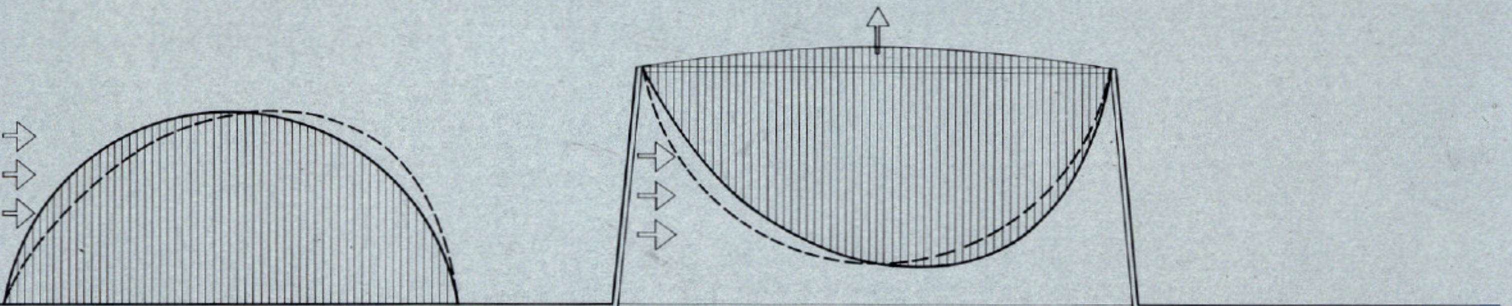


Mediante el incremento de la presión interior del aire, no solamente se compensa el peso propio de la envoltura del espacio, sino que la membrana es tensada también hasta un punto en el cual no puede ya ser deformada por cargas asimétricas.

La transmisión de las fuerzas por la membrana implica, por tanto, sólo resultantes centrífigas, de modo semejante a la acción de un depósito membrana sometido solamente a la presión de su contenido (líquidos, áridos, granulares).

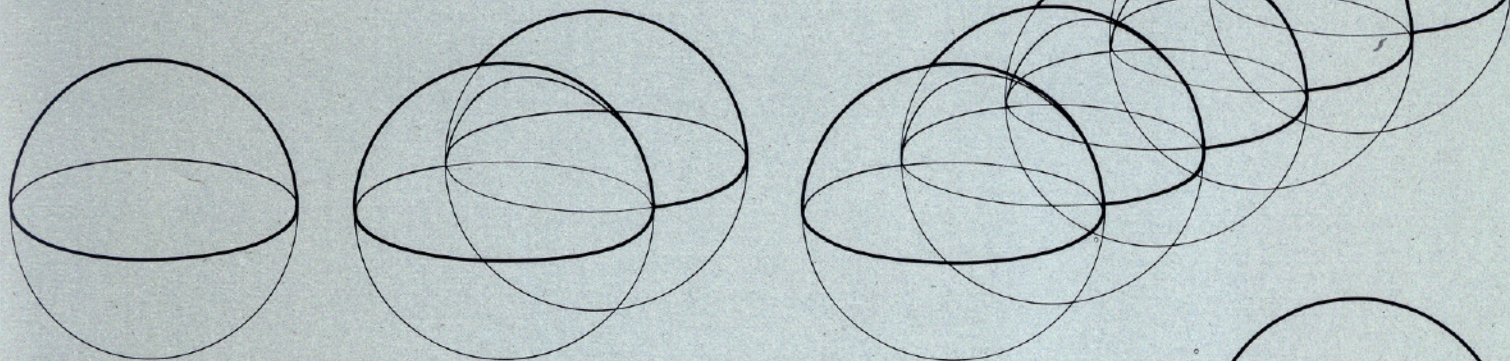


La presión interior funciona como un soporte continuo y elástico de la membrana en cualquier punto. De un modo similar, la forma de un depósito membrana se estabiliza por la presión centrífuga de su contenido; la ventaja de un soporte neumático estriba en que no estorba la libre utilización del espacio.



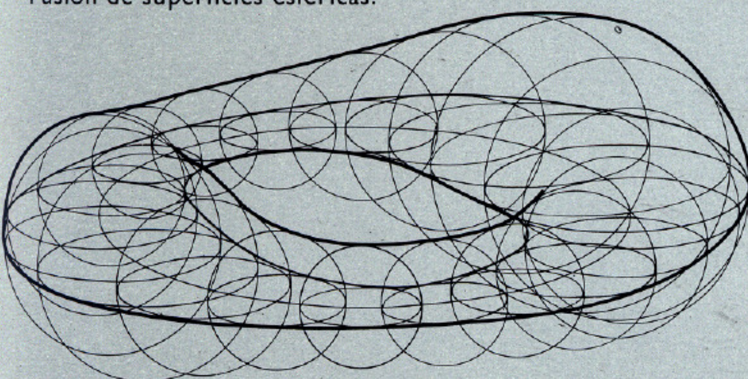
La resistencia a la deformación se consigue por la envoltura impermeable al aire y la tensión de tracción de la membrana. La forma estructural sólo puede deformarse como consecuencia de una pérdida de volumen o de un incremento de la superficie, contrariamente al depósito membrana colgado en el cual el contenido puede escaparse por la parte abierta (superior), permitiendo así la deformación.

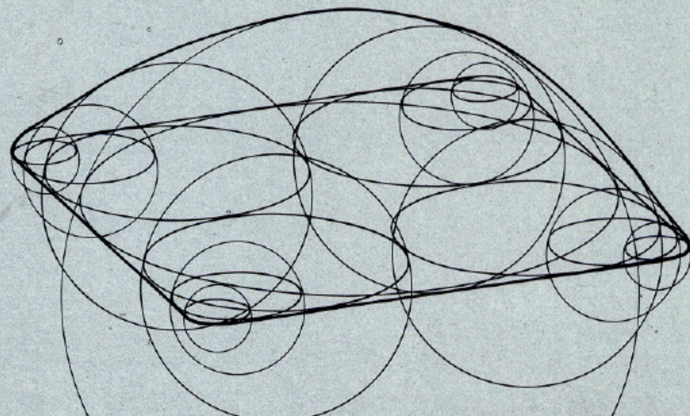
Geometría de las formas estructurales neumáticas



Adición de superficies esféricas.

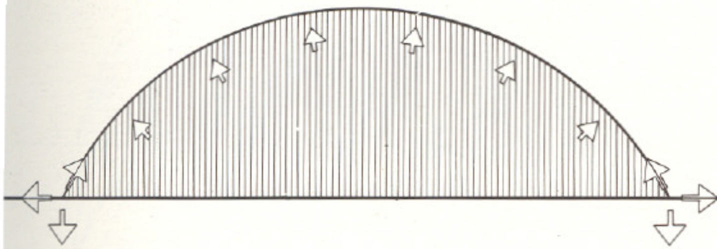
Fusión de superficies esféricas.

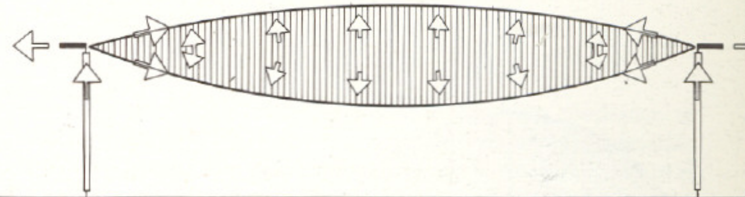




Punto de partida para todas las formas estructurales neumáticas es la esfera, para la cual las tensiones de la membrana sometida a presión interior uniforme son iguales en cualquier punto. Otras formas estructurales pueden desarrollarse por adición o fusión de superficies esféricas.

Tipos básicos de sistemas de estructuras neumáticas

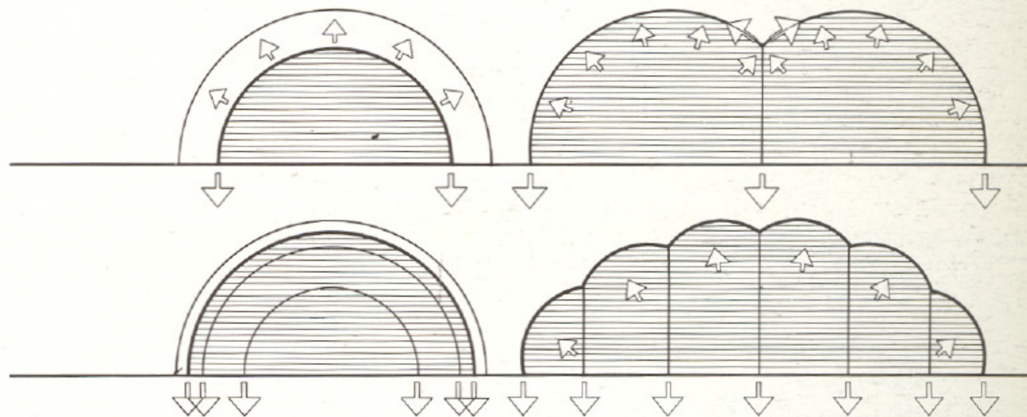


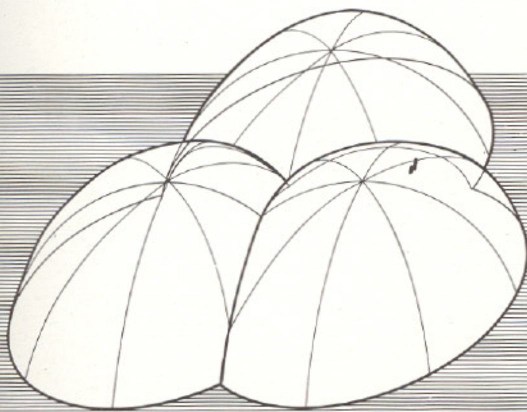


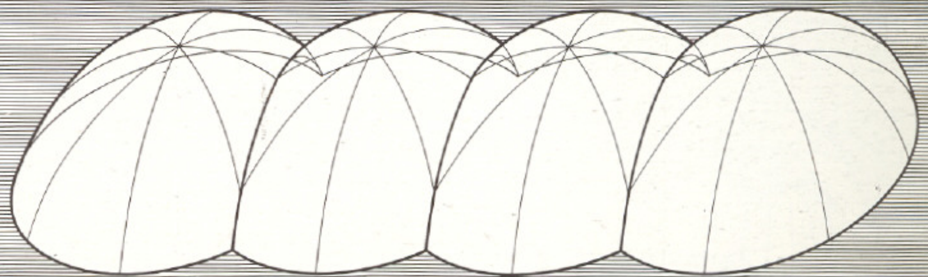
El aire sometido a presión en la «almohada» sirve solamente para estabilizar la membrana sustentante. El espacio cubierto permanece sin sobrepresión.

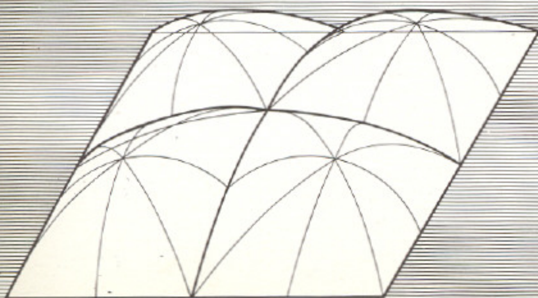
Sistemas de presión interior con transmisión principal de cargas mediante cables.

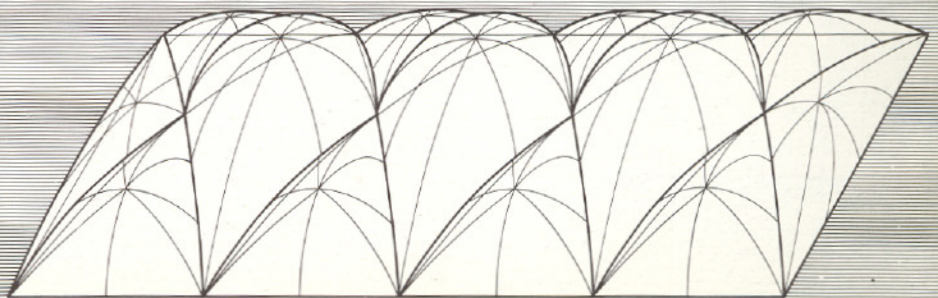
Mediante el tensado de cables aislados, la superficie esférica puede dividirse en secciones con menor radio de curvatura y, por tanto, menores tensiones de membrana. Los cables transmiten los esfuerzos principales, en tanto que la membrana ejerce la función de una estructura secundaria intermedia.



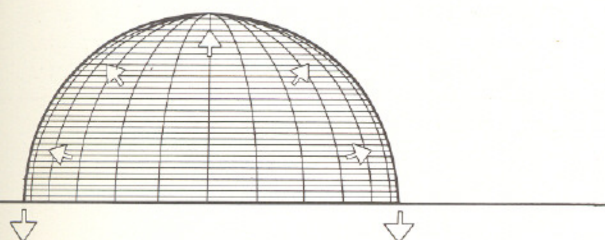


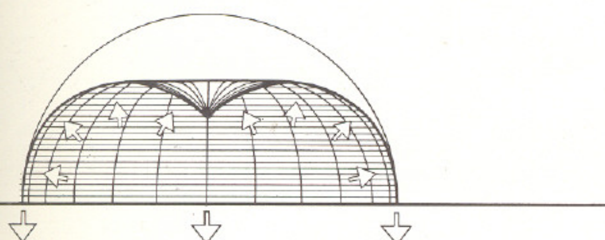


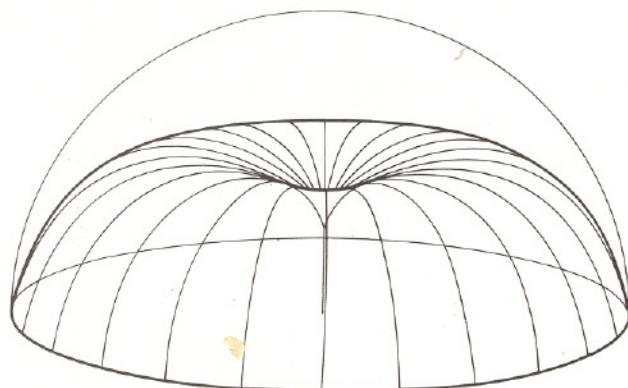




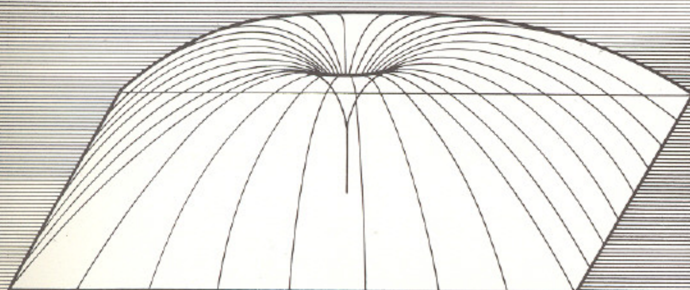
Sistemas de presión interior con puntos de anclaje interiores

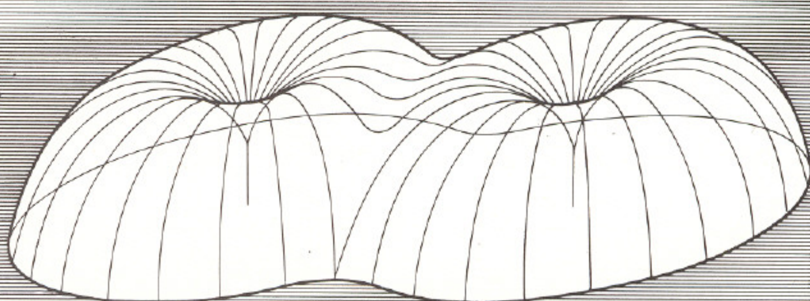


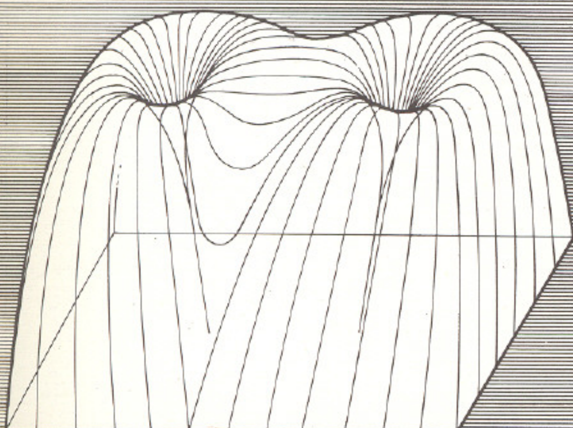


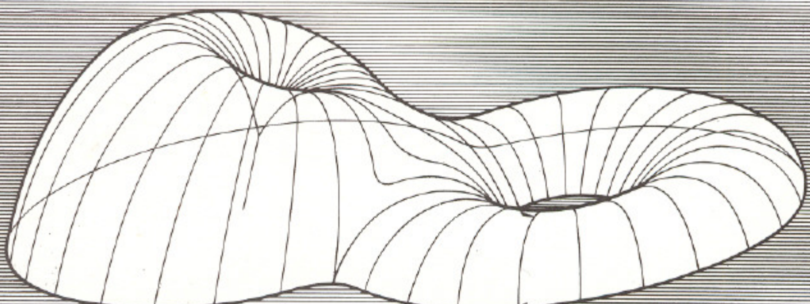


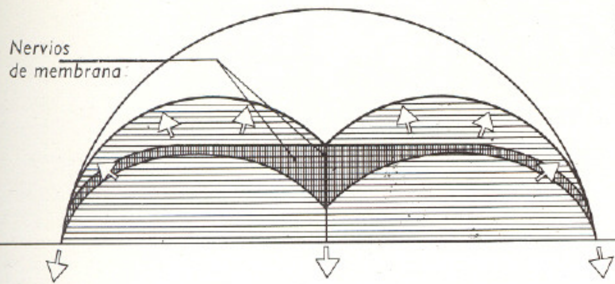
Por medio del anclaje de la membrana no sólo en el borde, sino también en la zona central, se reduce el radio de curvatura y, por tanto, también las tensiones de la membrana. Por lo cual, la cobertura y el cerramiento de espacios amplios son posibles sin incrementar la altura de la construcción.





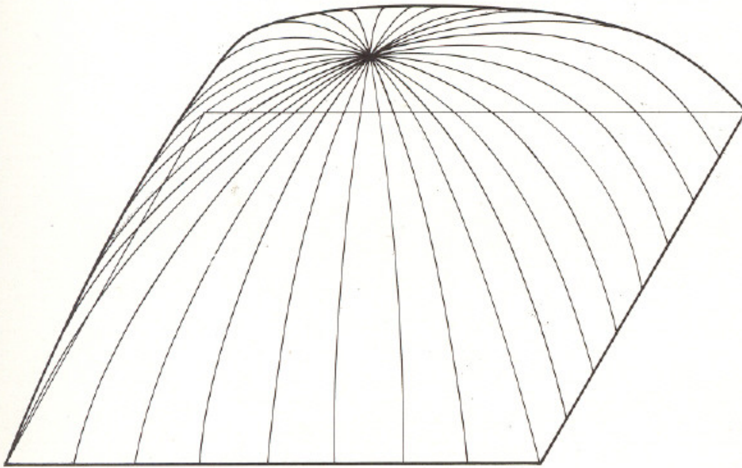


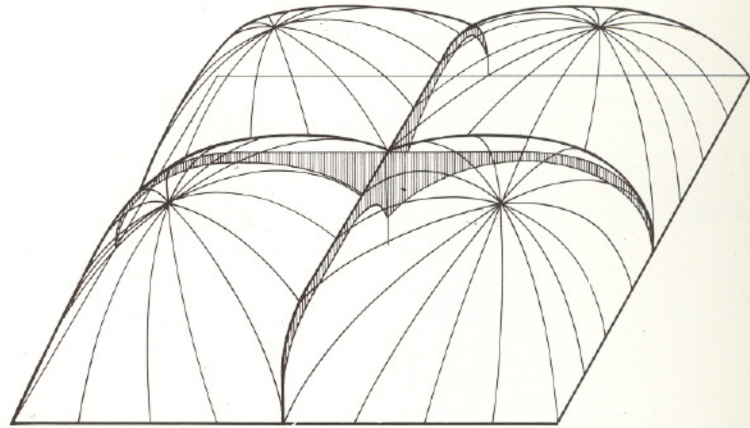


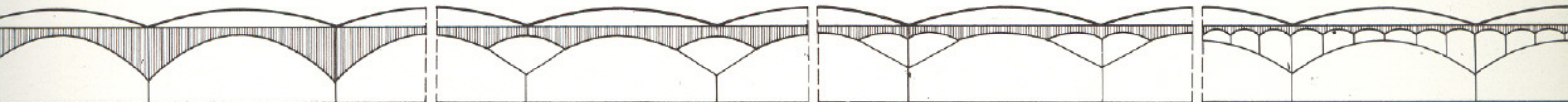


Sistemas neumáticos de presión interior con transmisión de cargas principales a través de nervios de membrana

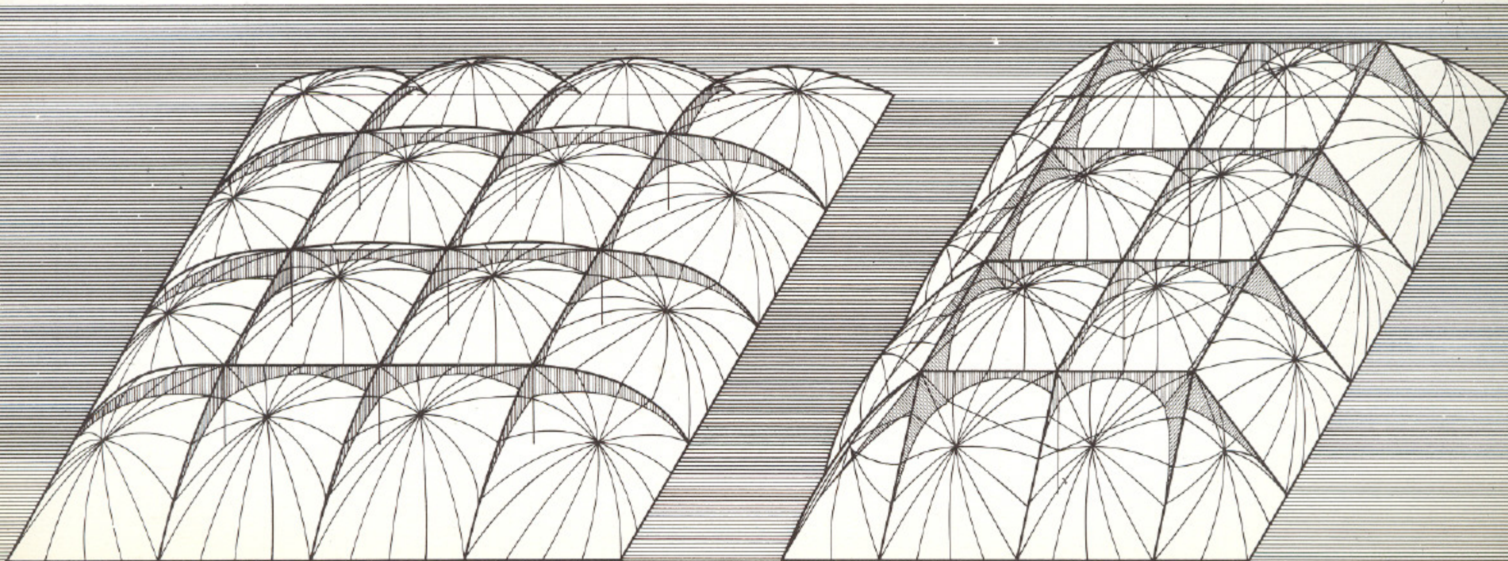
No sólamente mediante cables aislados, sino también mediante el empleo de membranas verticales (nervios de membrana) ancladas al suelo, puede la superficie esférica subdividirse en secciones más pequeñas con menor radio de curvatura y, por tanto, menores tensiones de membrana, ya que de este modo es posible formar limas rectilíneas y pueden cubrirse amplios arcos.

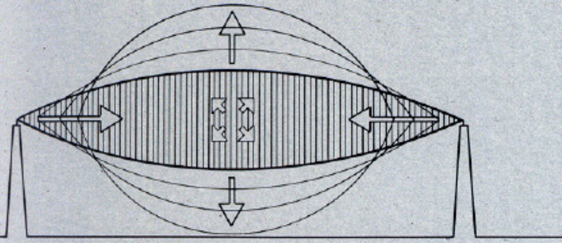






Esquema de nervios de membrana.

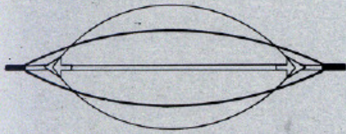


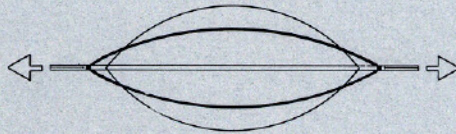


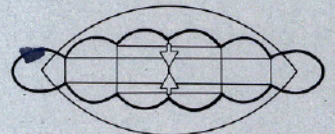
Sistemas de doble membrana

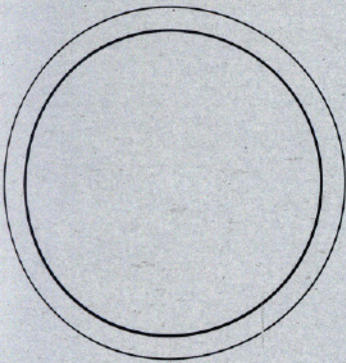
Mediante cerramiento inferior del aire presionado, por otra membrana (en lugar de incorporar el suelo), pueden tensarse espacios abiertos al exterior. Requisito previo para el mecanismo sustentante es que la membrana no pueda adoptar la forma esférica en su región media.

Sistemas de retención contra el abombamiento.

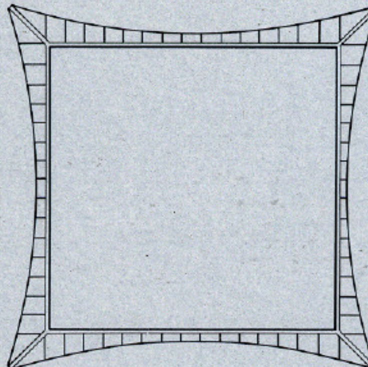




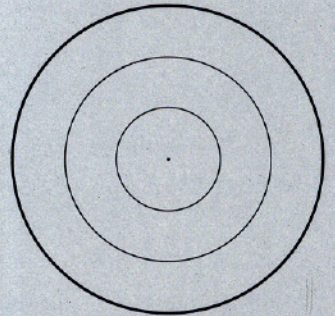




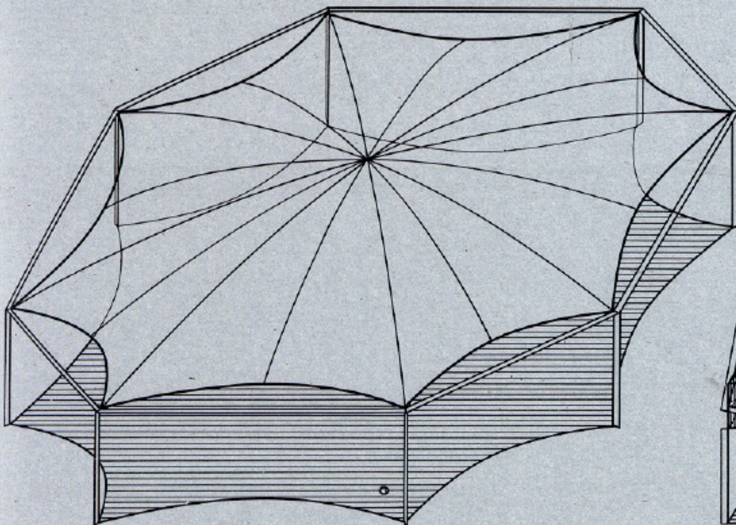
Rigidización de borde mediante anillo de compresión.



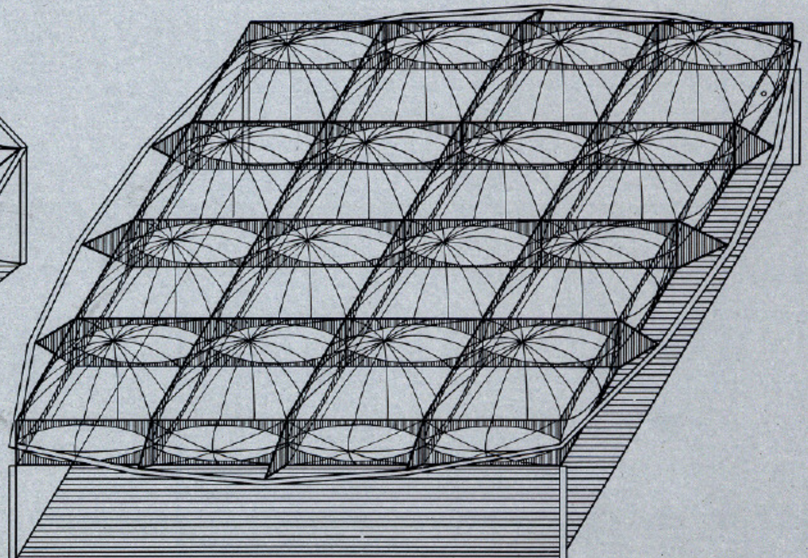
Rigidización del borde mediante elementos en compresión y cables en tracción.



Control de la altura con cables interiores o nervaduras.



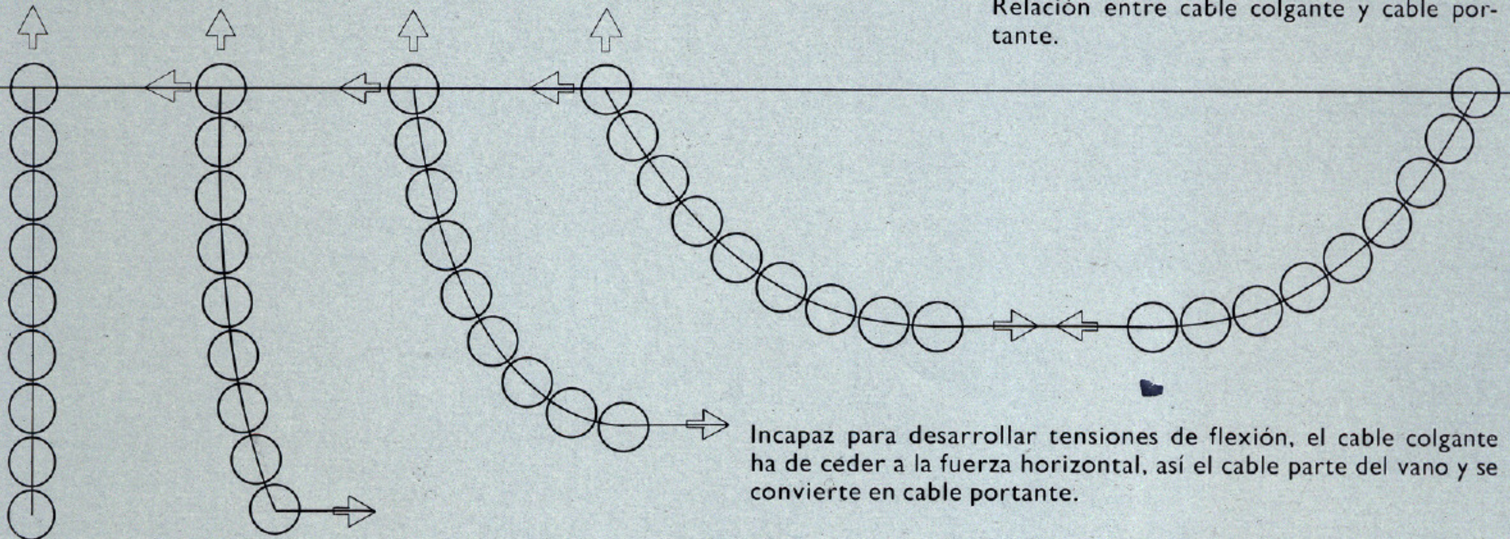
Sistema de cámara simple con anillo de compresión poligonal.



Sistema de cámaras múltuples con nervaduras de membrana y arcos comprimidos como mecanismo de retención.

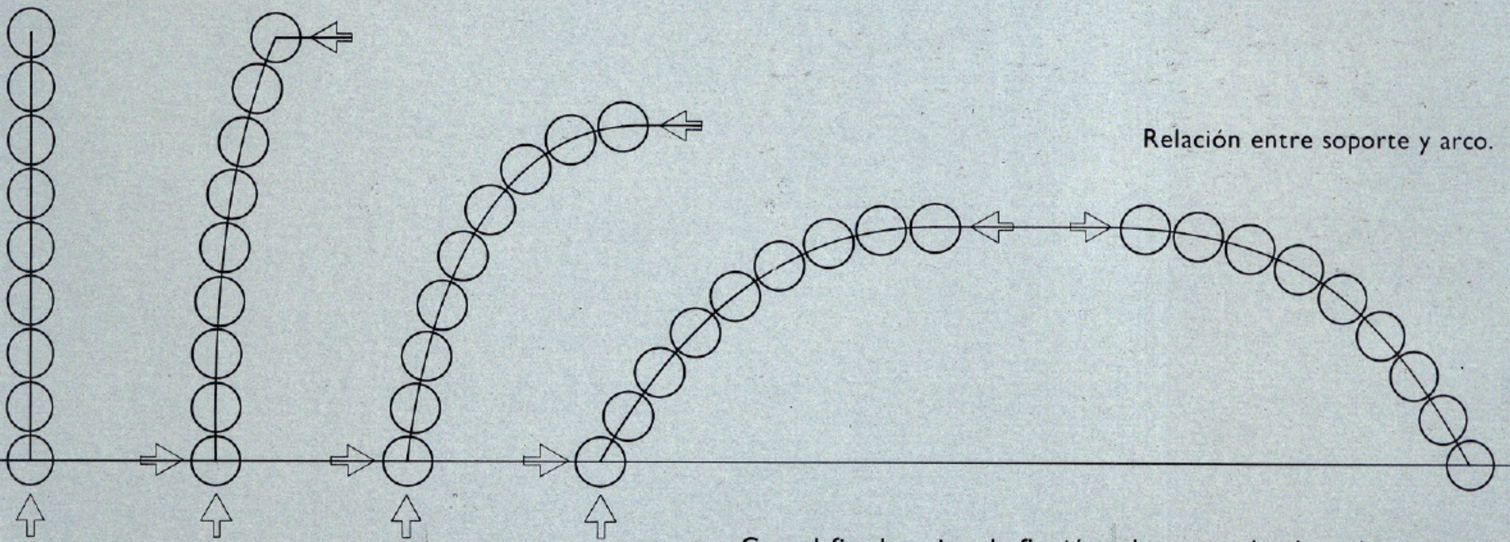
Formas autosustentantes sometidas a compresión simple o a tracción

Relación entre cable colgante y cable portante.

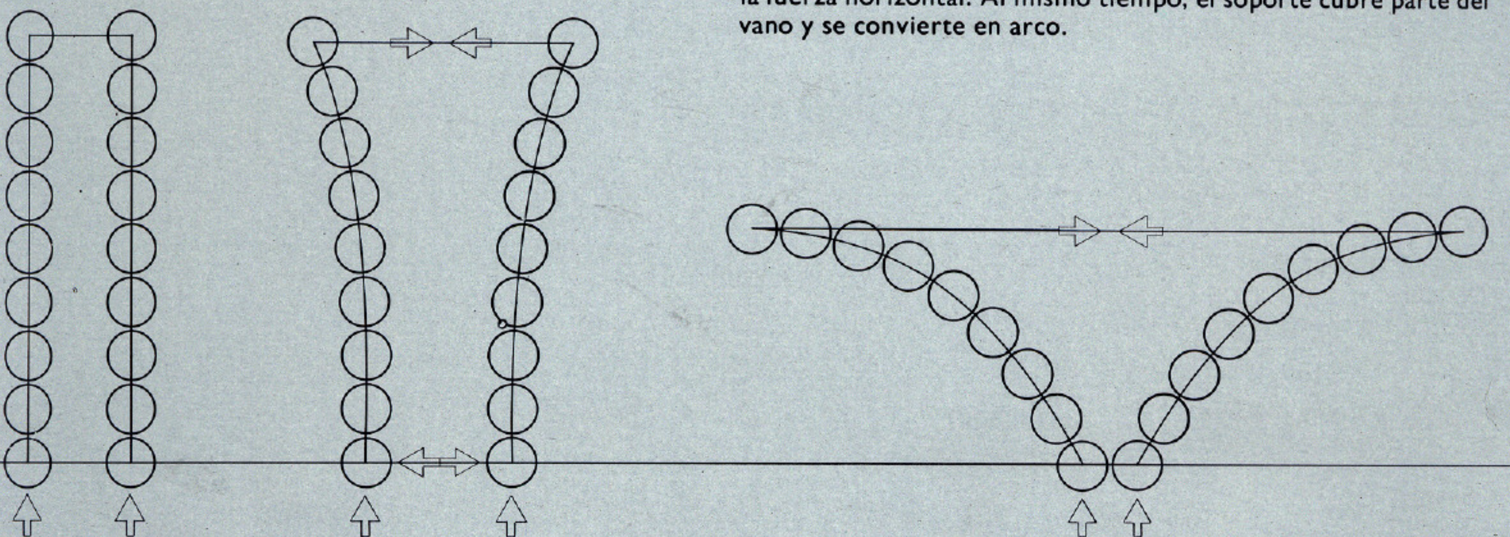


Incapaz para desarrollar tensiones de flexión, el cable colgante ha de ceder a la fuerza horizontal, así el cable parte del vano y se convierte en cable portante.

Relación entre soporte y arco.

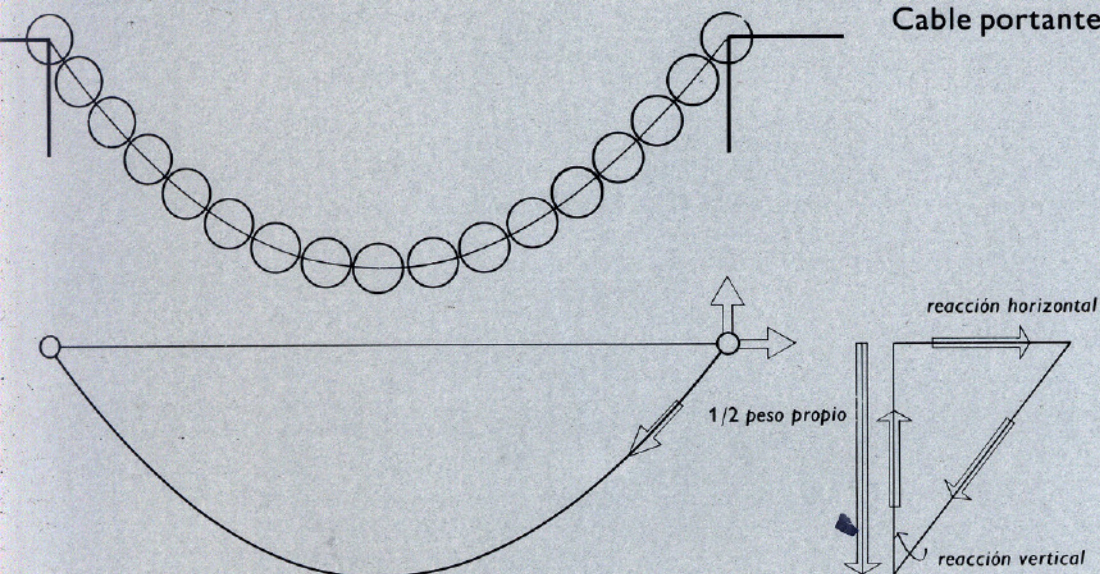


Con el fin de evitar la flexión, el soporte ha de inclinarse ante la fuerza horizontal. Al mismo tiempo, el soporte cubre parte del vano y se convierte en arco.



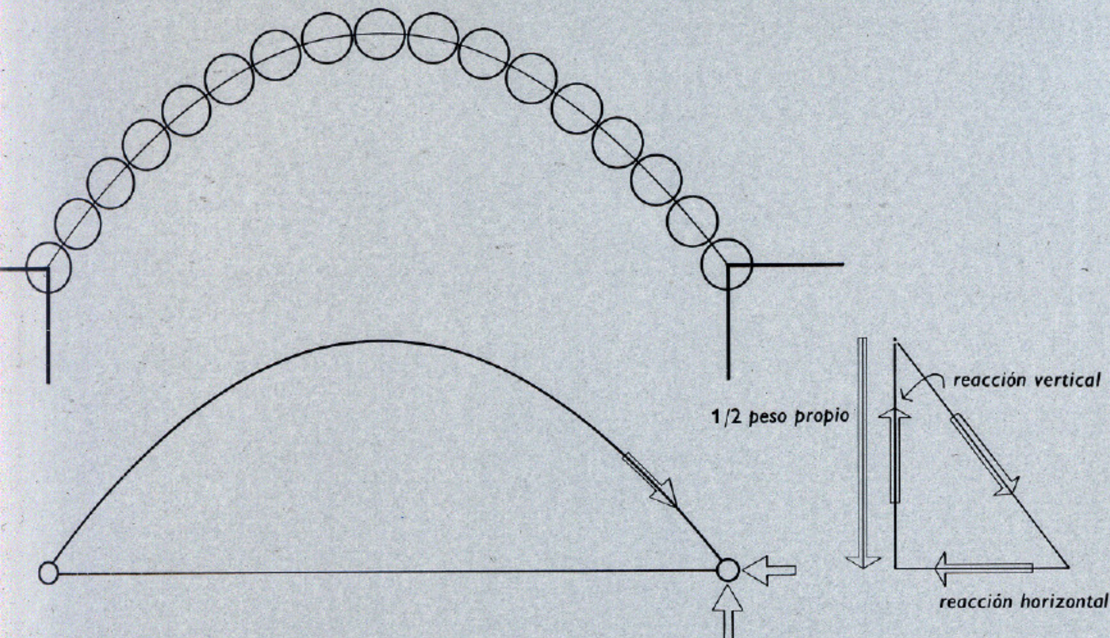
Cable portante y arco

mecanismo de sustentación



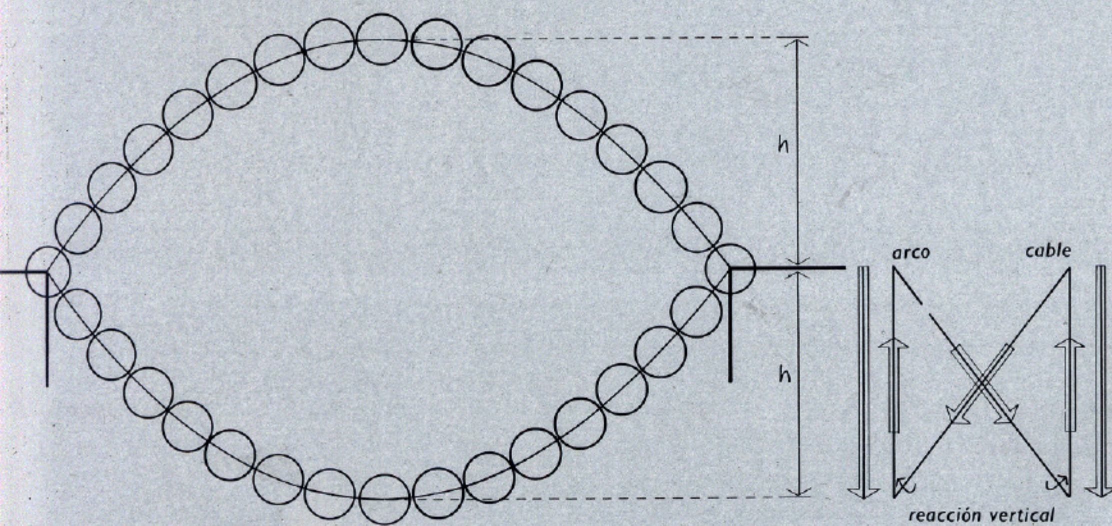
cable portante

El cable portante es capaz de desarrollar solamente tracciones. Bajo su propio peso, adopta la forma de una catenaria.



arco funicular

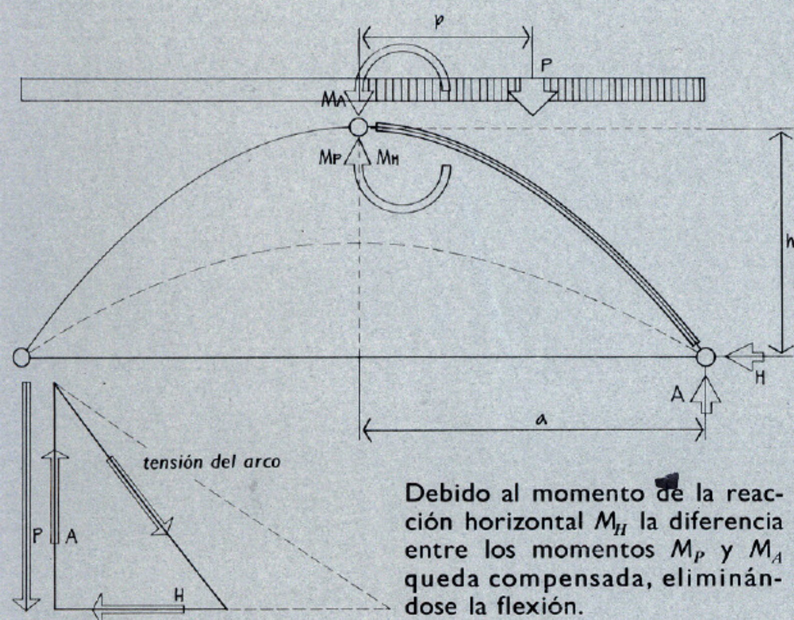
El cable invertido admite sólo compresiones de la misma magnitud que las tracciones en el cable. Así, la forma funicular de un arco sometido a su propio peso es una catenaria invertida.



combinación de arco/cable portante

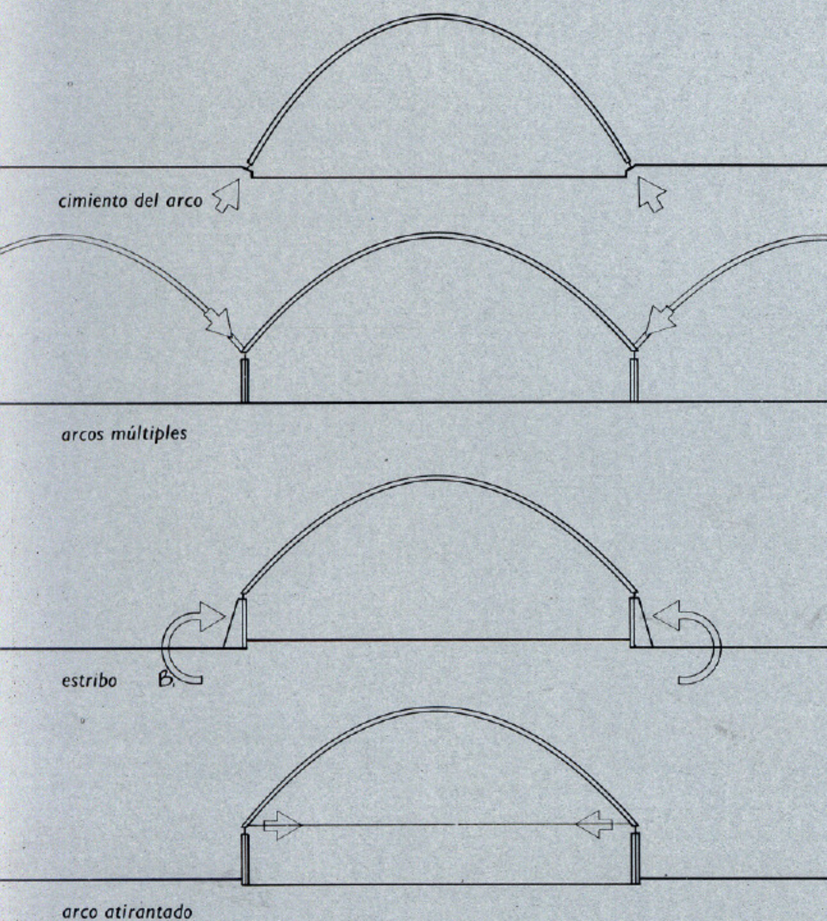
La combinación de cable portante y arco no produce ninguna reacción horizontal, ya que las componentes horizontales de ambos tienen direcciones opuestas y se anulan entre sí.

Mecanismo de palanca del arco funicular

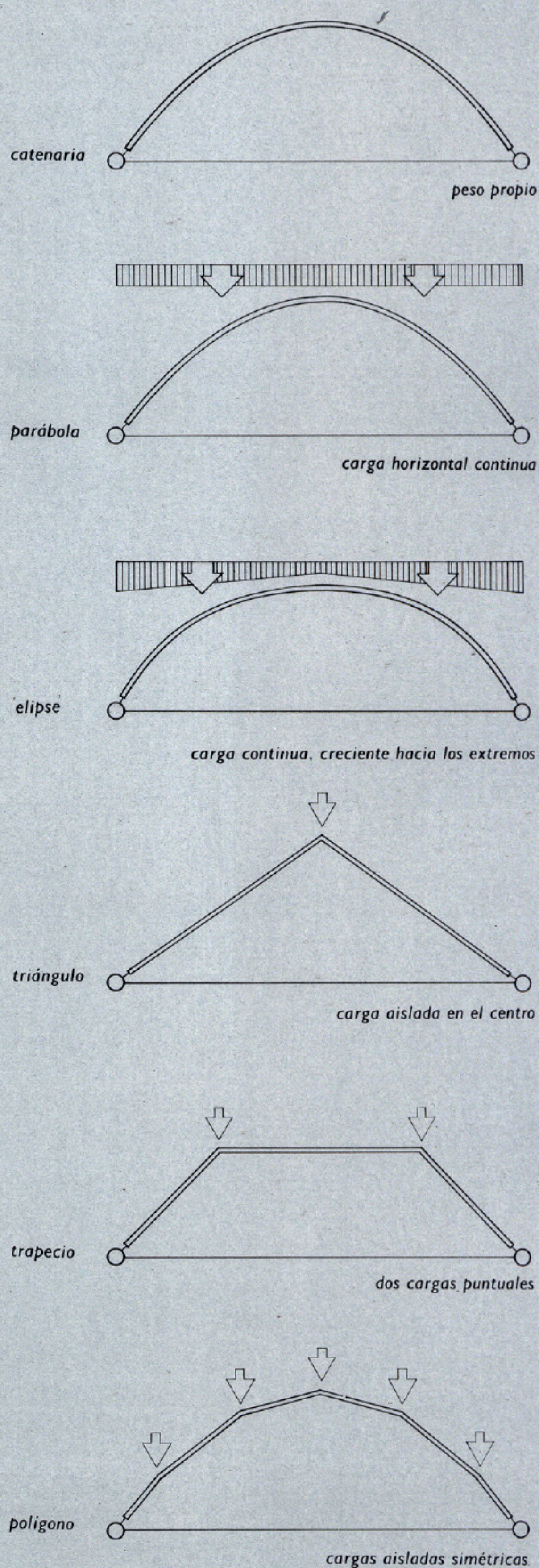


Debido al momento de la reacción horizontal M_H la diferencia entre los momentos M_P y M_A queda compensada, eliminándose la flexión.

Sistemas de arcos caracterizados por la resistencia del empuje horizontal

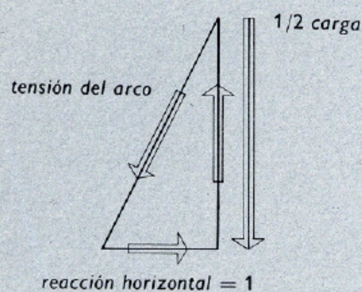


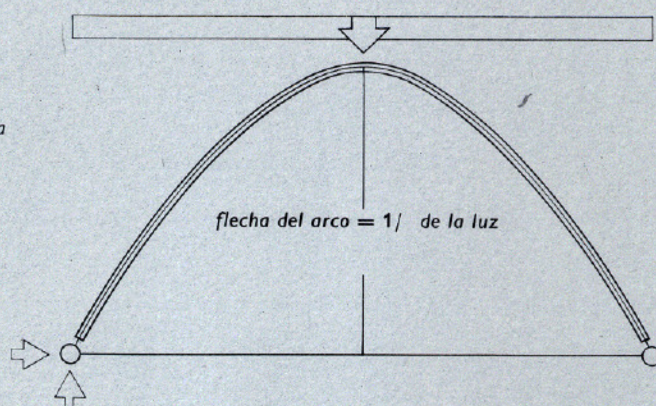
Formas geométricas

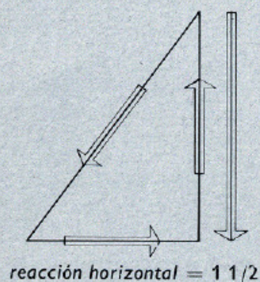


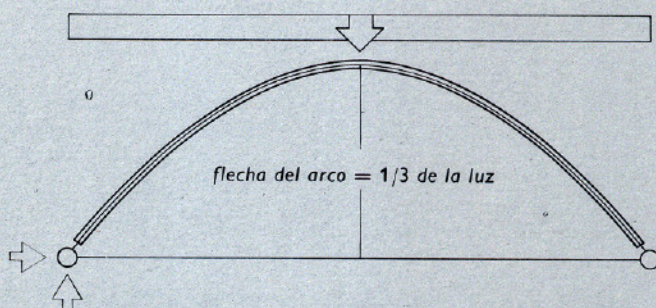
Influencia de la flecha del arco en los empujes en arranques

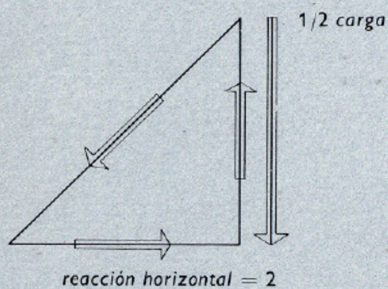
El empuje de un arco es inversamente proporcional a su flecha. Para reducir el empuje, la flecha del arco debe ser lo mayor posible.

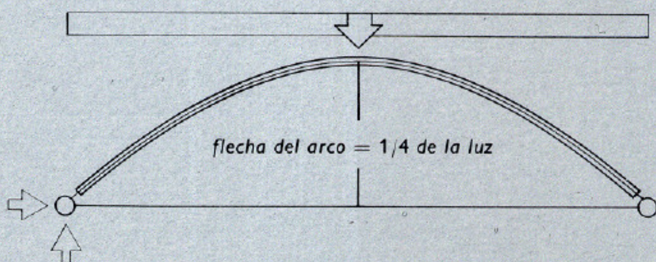


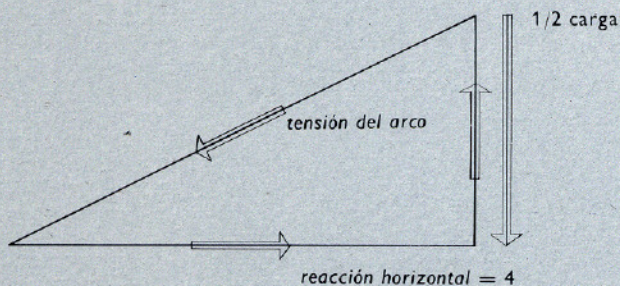


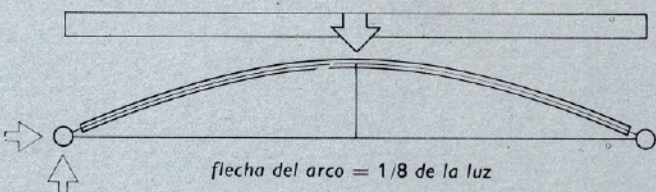




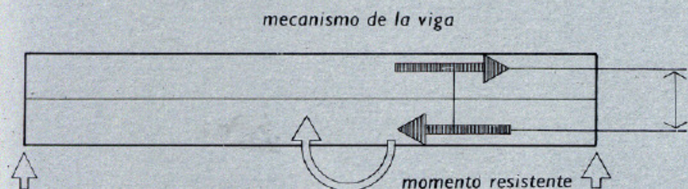


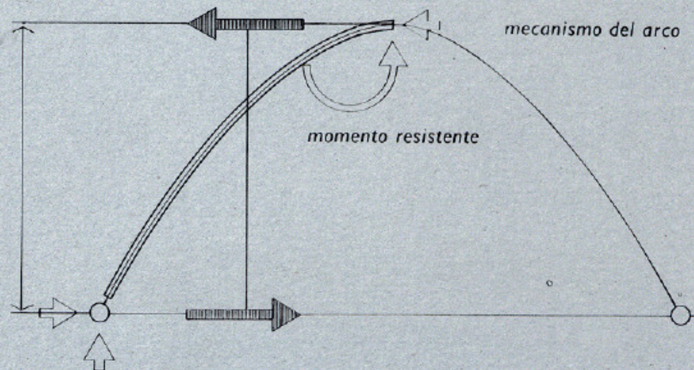




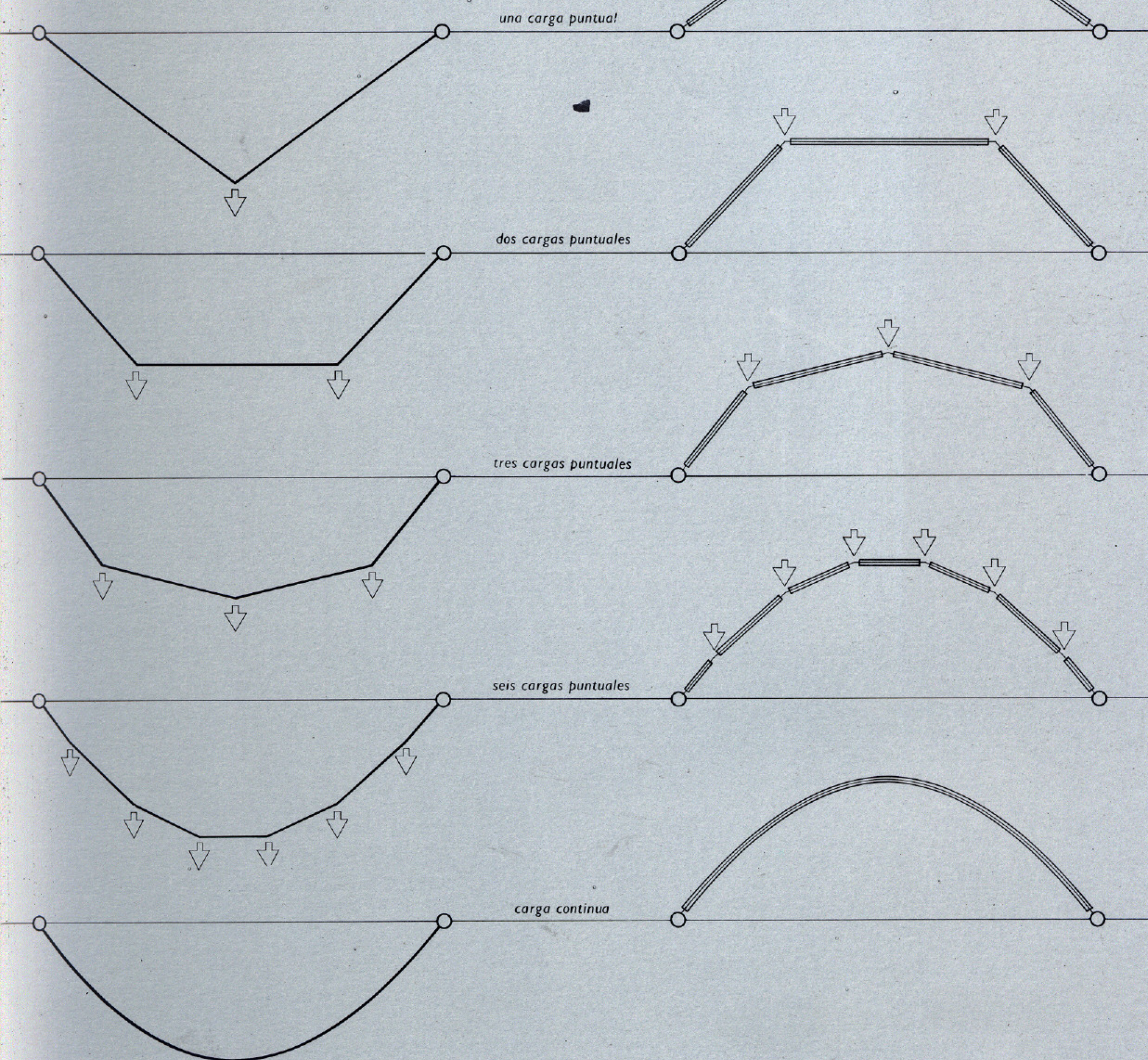


Comparación entre el mecanismo de la viga y el mecanismo del arco

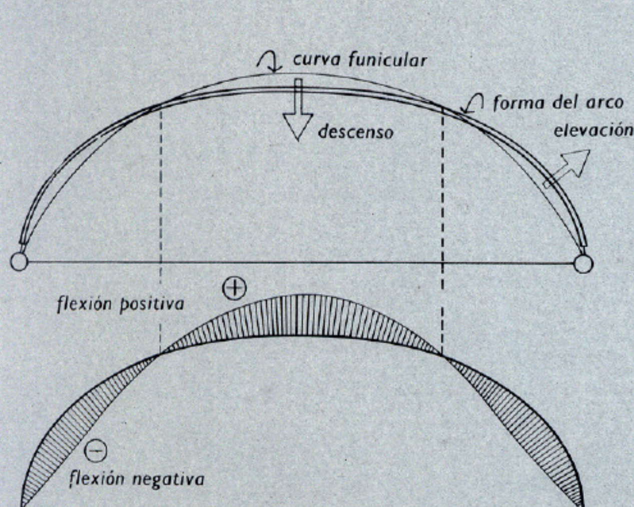


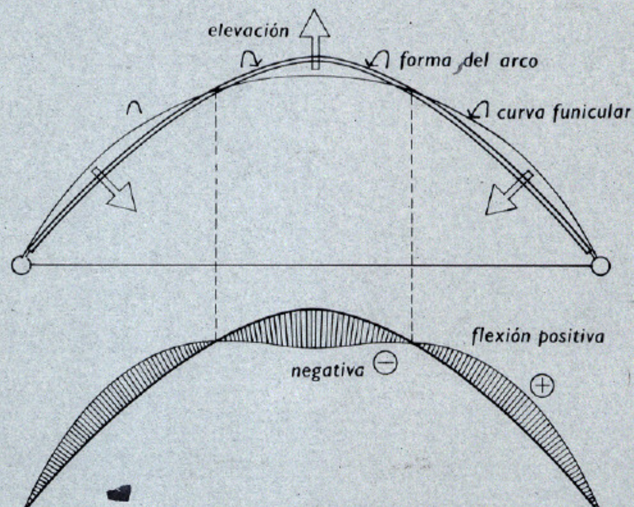


Relación entre el cable portante y el arco funicular



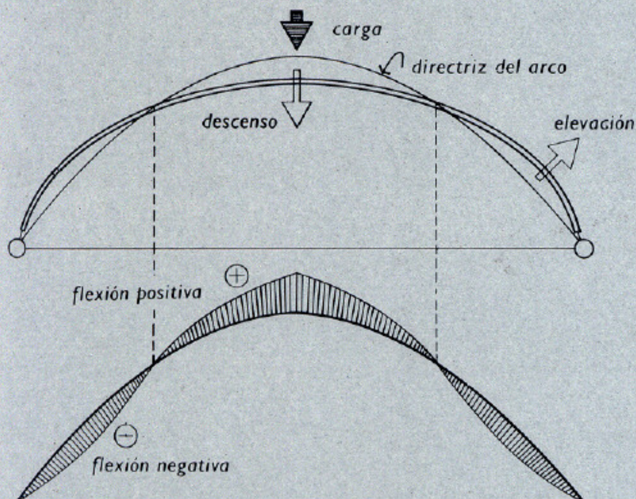
Flexión debida a la desviación de la directriz del

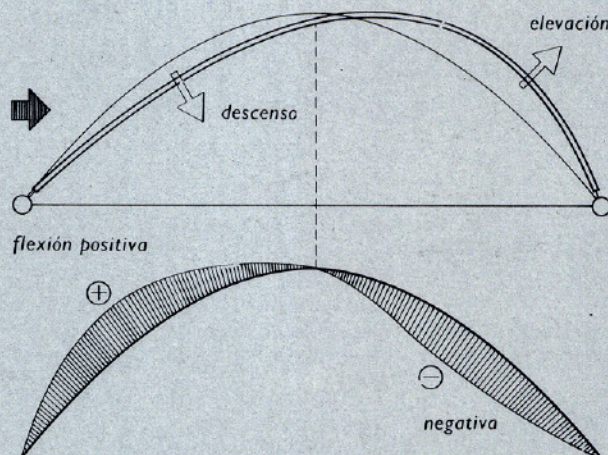




Cualquier desviación de la directriz del arco respecto de la curva funicular resultará, bien en una elevación o bien en un descenso de la curva funicular, originándose flexiones en ambos casos.

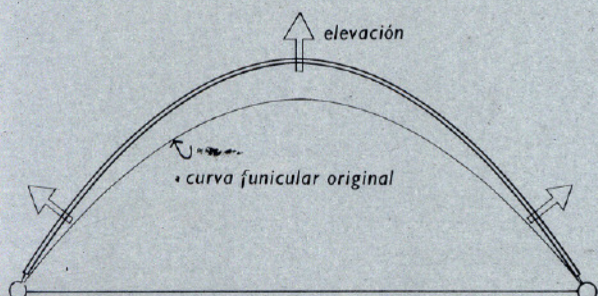
Flexión debida a una carga adicional, vertical u horizontal





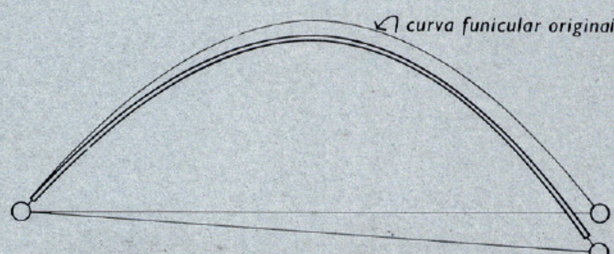
Cualquier carga adicional produciría una deformación del arco y por tanto, una desviación respecto de la curva funicular, produciéndose una flexión.

Variaciones térmicas



La dilatación (contracción) debida a variaciones térmicas introduce una flexión

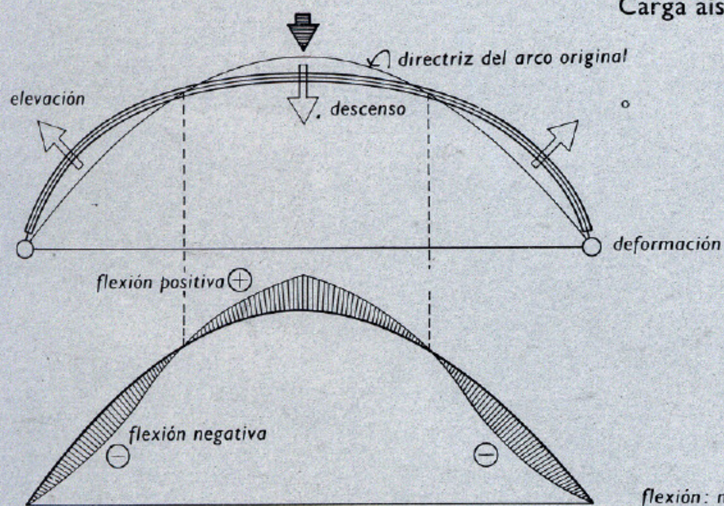
Asiento de apoyo

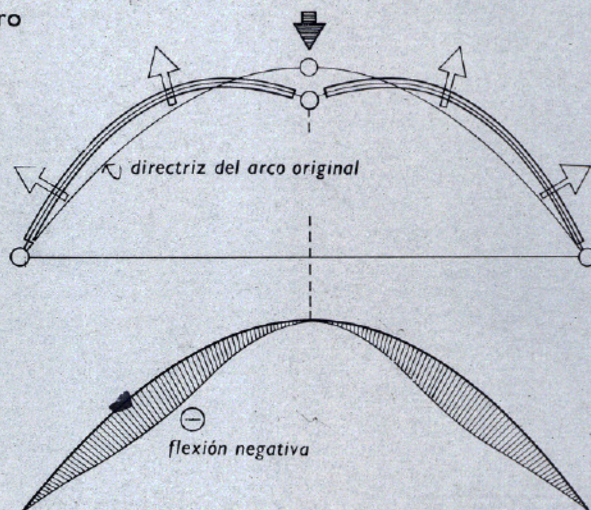


Una diferencia de cargas producida por asientos desiguales origina una flexión.

Comparación entre los arcos de dos y tres articulaciones

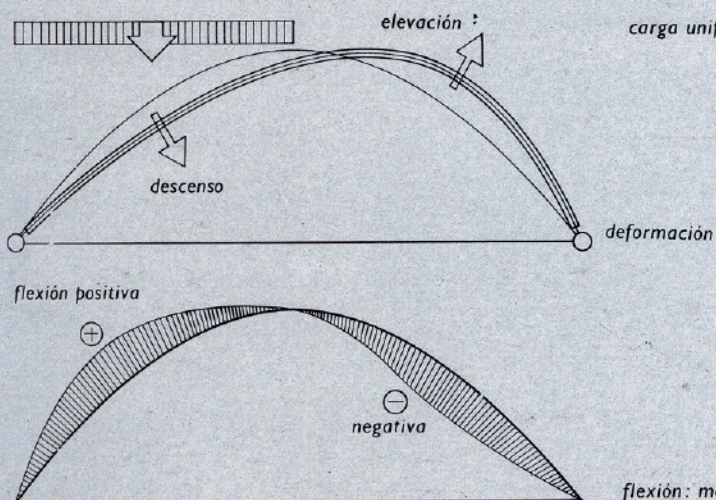
Carga aislada en el centro

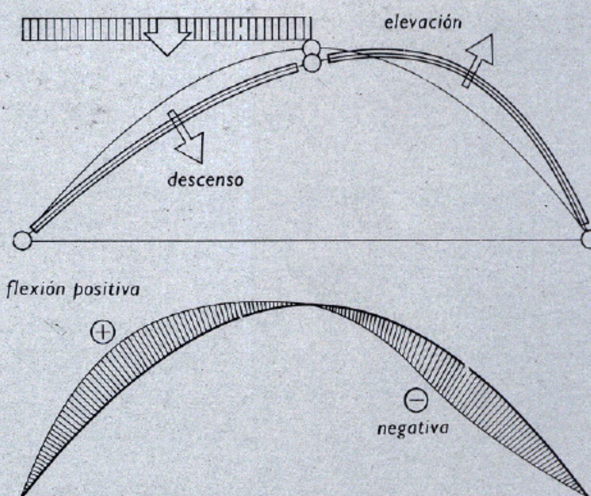




flexión: magnitud relativa

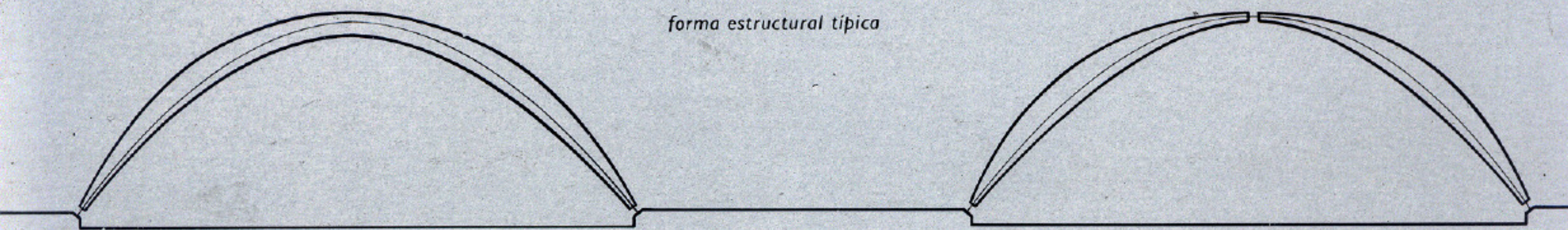
carga uniforme asimétrica

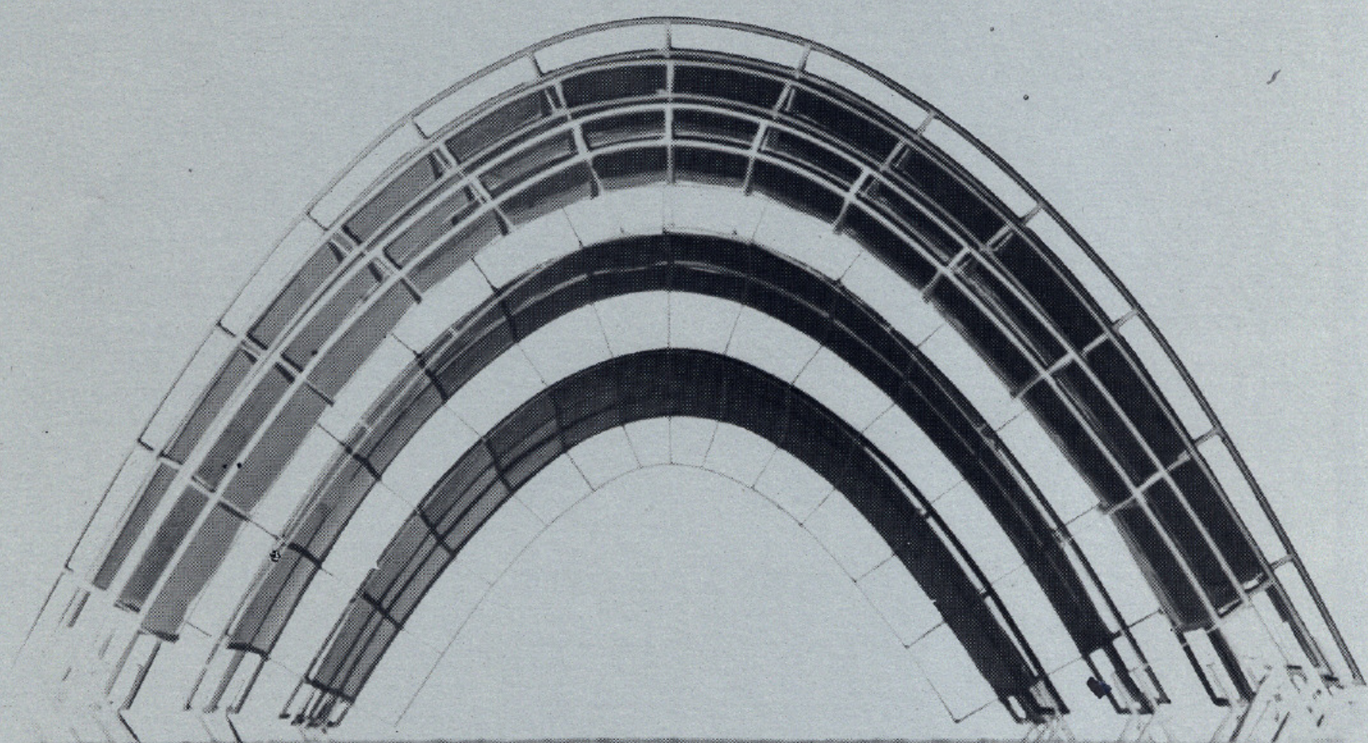


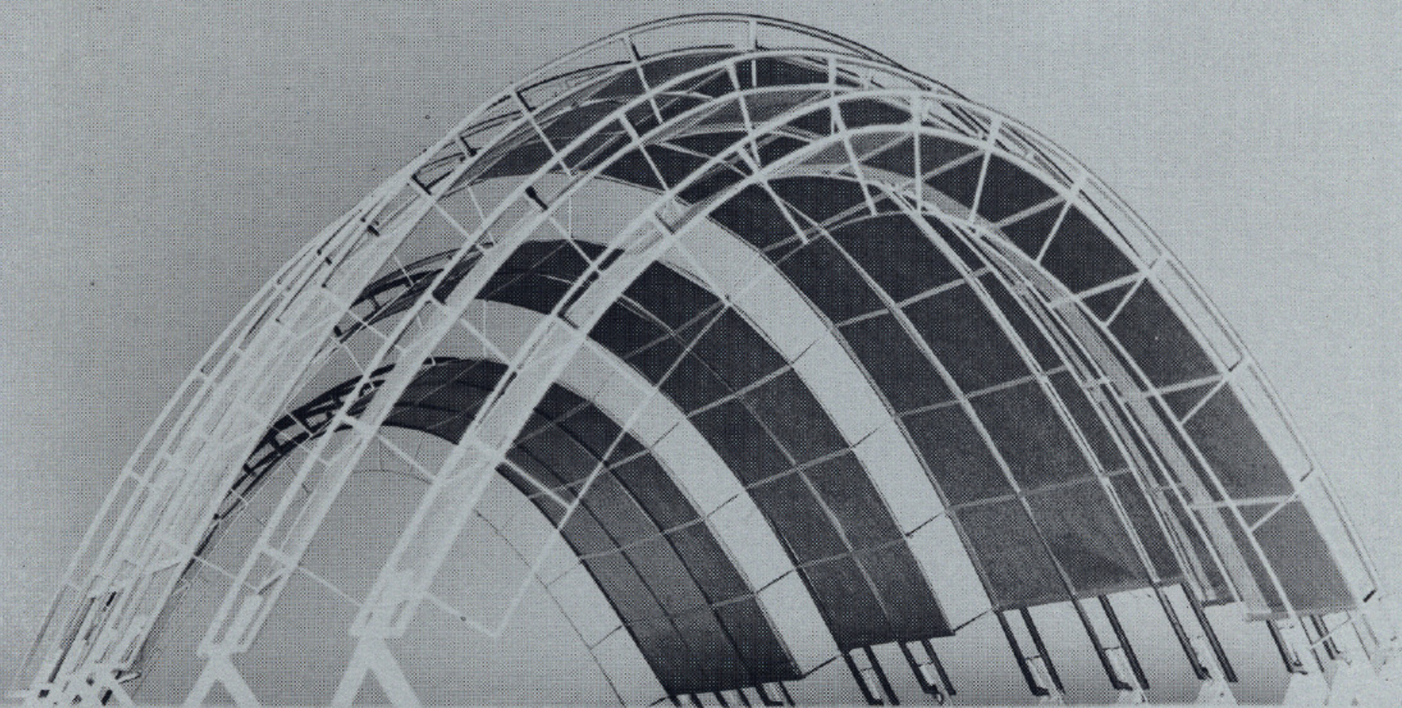


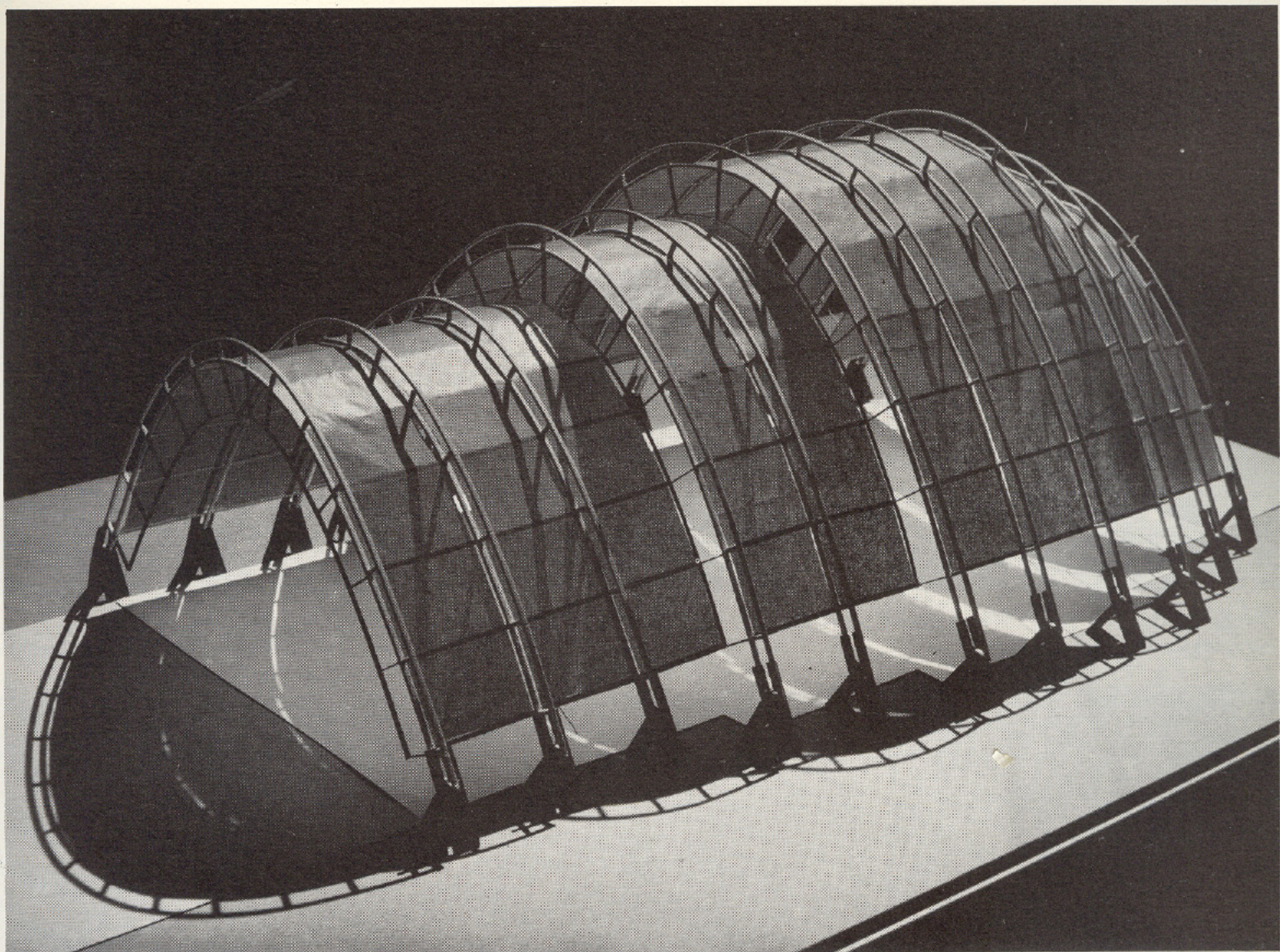
flexión: magnitud relativa

forma estructural típica









Sistema de arcos de dos articulaciones con diferentes dimensiones.

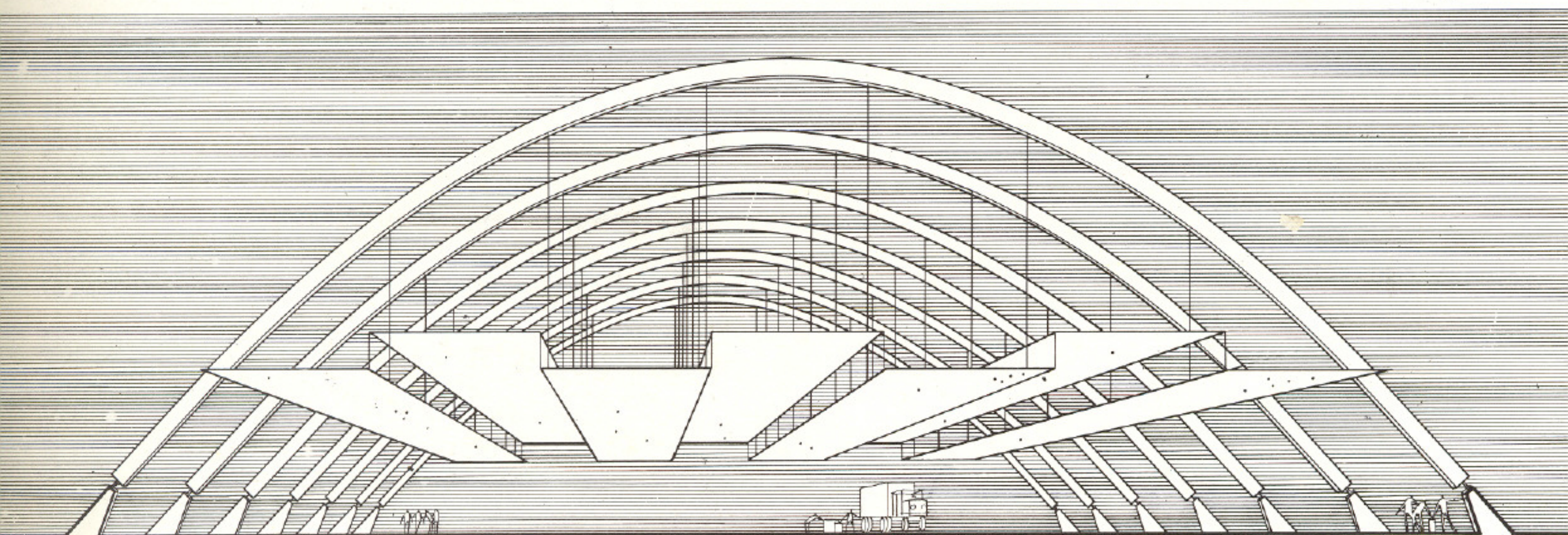
Sistemas estructurales de grandes luces con arcos de dos articulaciones



Arcos anclados al suelo con cubierta curva apoyada encima.

Curva funicular: catenaria.

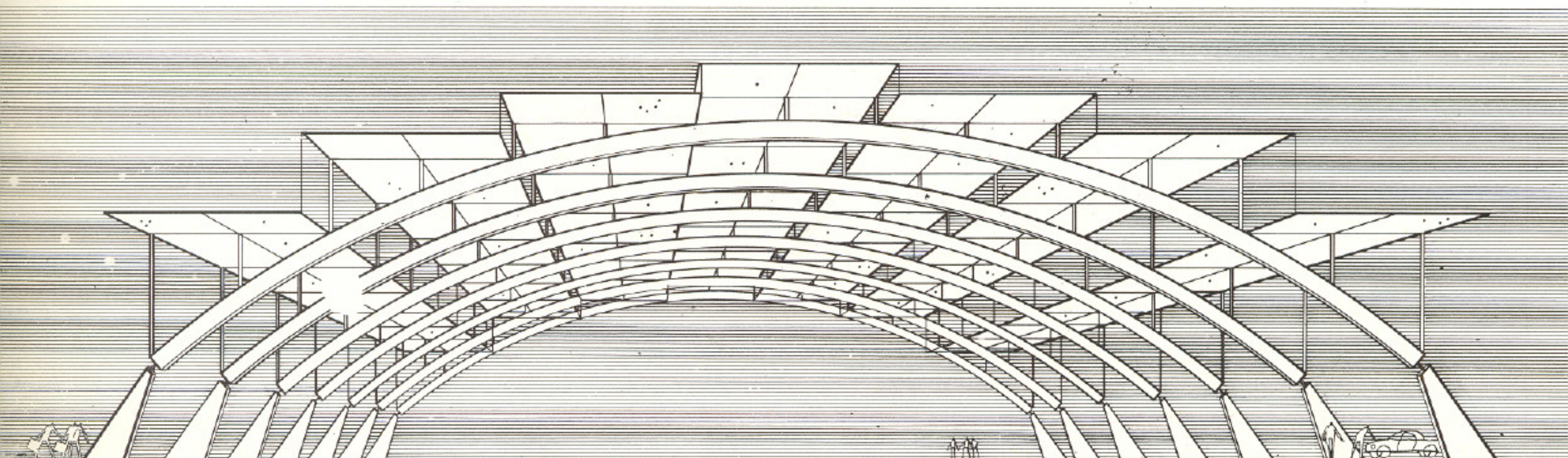
Ságita del arco = 1/5 de la luz.



Arcos con estribos, con cubierta horizontal, colgada.

Curva funicular: polígono parabólico.

Ságita del arco: 1/3 de la luz.

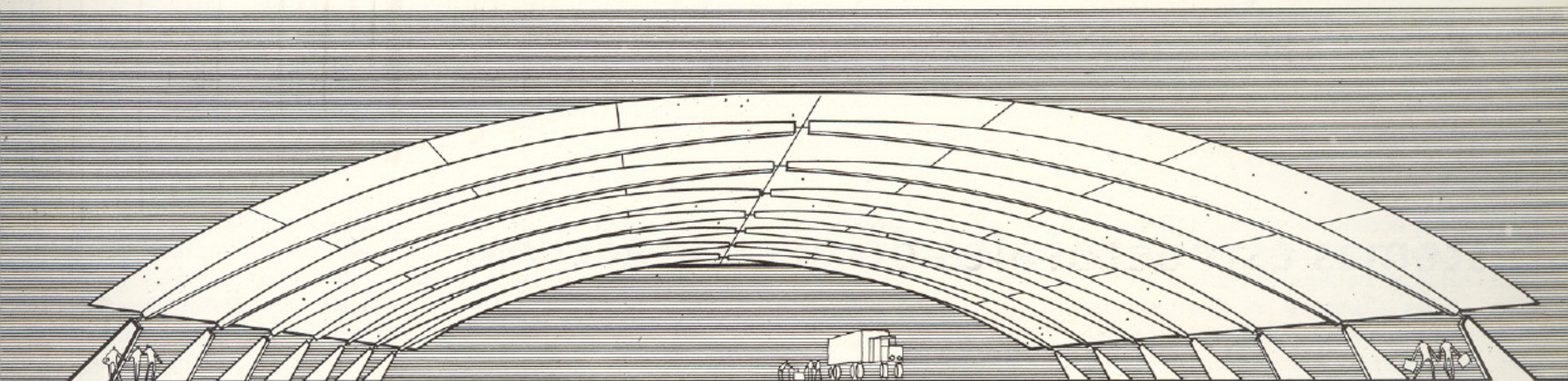


Arcos con estribos con cubierta horizontal apoyada

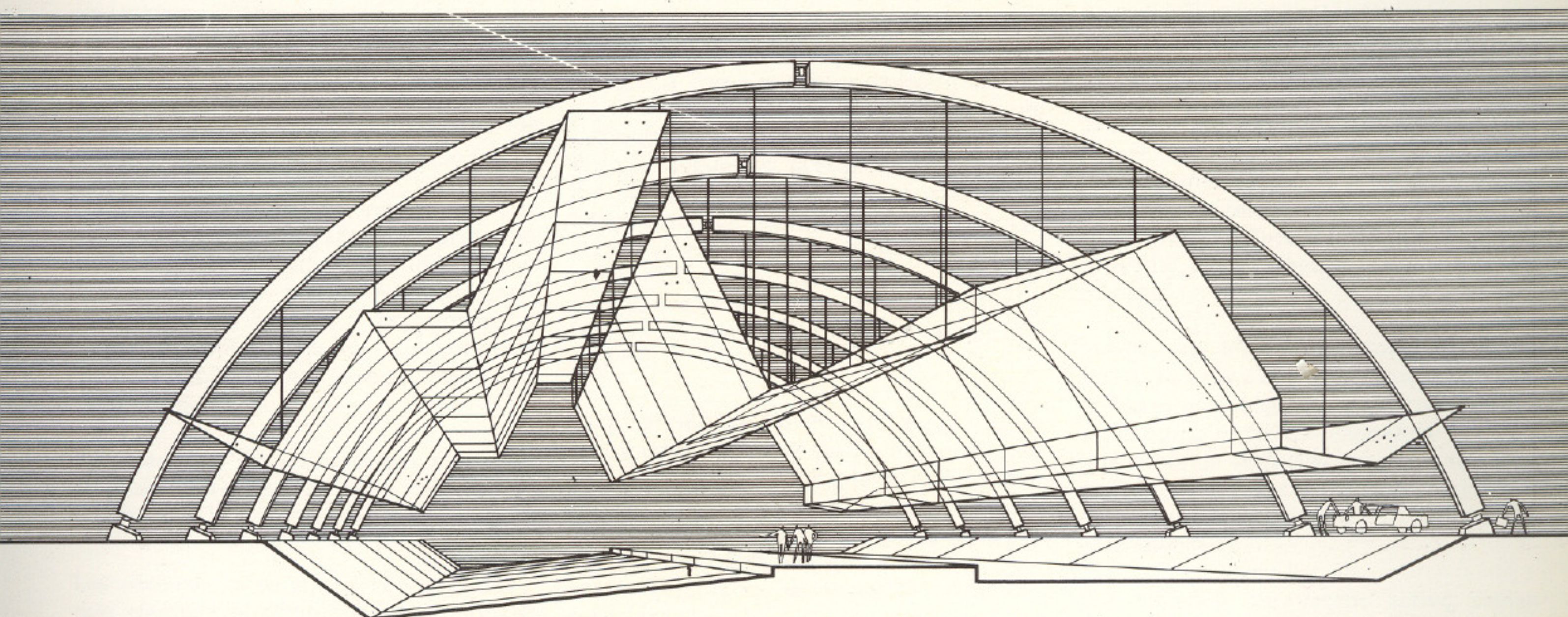
Curva funicular: polígono parabólico.

Ságita del arco = 1/5 de la luz.

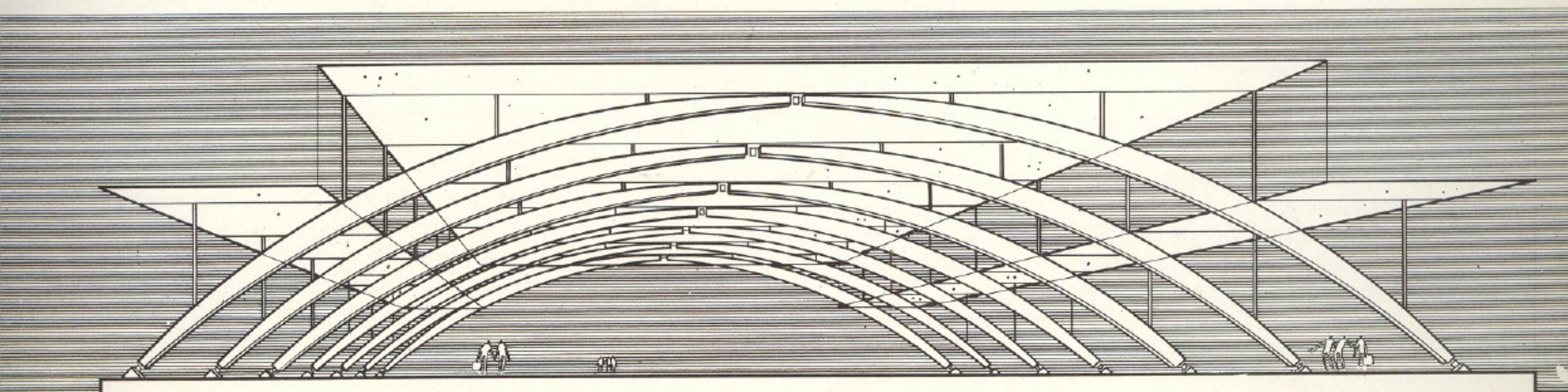
Sistemas estructurales de grandes luces, con arcos de tres articulaciones



Arcos con estribos con cubierta curva apoyada encima. Curva funicular: catenaria. Ságita del arco = 1/7 de la luz.



Arcos anclados al suelo en forma de segmentos, con cubierta colgante de forma libre. Curva funicular: polígono irregular. Ságita del arco = 1/3 de la luz.



Arcos anclados al suelo, soportando una cubierta horizontal apoyada. Curva funicular: polígono parabólico. Ságita del arco = 1/5 de la luz.